

Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura

Visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos



Cubierta:

Ilustración por Emanuela D'Antoni.

Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura

Visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos

Editado por

Kevern Cochrane
Jefe del Servicio de Gestión y Conservación Pesquera
División de Gestión de la Pesca y la Acuicultura
Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO
Roma (Italia)

Cassandra De Young
Analista de políticas pesqueras
División de Economía y Políticas de la Pesca y la Acuicultura
Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO
Roma (Italia)

Doris Soto
Oficial superior de recursos pesqueros (acuicultura)
División de Gestión de la Pesca y la Acuicultura
Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO
Roma (Italia)

Tarûb Bahri
Oficial de recursos pesqueros
División de Gestión de la Pesca y la Acuicultura
Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO
Roma (Italia)

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en esta publicación son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la FAO.

ISBN 978-92-5-306347-5

Todos los derechos reservados. La FAO fomenta la reproducción y difusión del material contenido en este producto informativo. Su uso para fines no comerciales se autorizará de forma gratuita previa solicitud. La reproducción para la reventa u otros fines comerciales, incluidos fines educativos, podría estar sujeta a pago de tarifas. Las solicitudes de autorización para reproducir o difundir material de cuyos derechos de autor sea titular la FAO y toda consulta relativa a derechos y licencias deberán dirigirse por correo electrónico a: copyright@fao.org, o por escrito al Jefe de la Subdivisión de Políticas y Apoyo en materia de Publicaciones, Oficina de Intercambio de Conocimientos, Investigación y Extensión, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma (Italia).

© FAO 2012

© FAO 2009, English edition. © FAO 2009, Edición en Ingles

Este documento se publicó originalmente en el 2009 bajo el título "Climate Change implications for fisheries and aquaculture – Overview of current scientific knowledge". Las referencias bibliográficas al comienzo de cada capítulo reflejan la fecha de publicación del documento original.

Preparación de este documento

Este documento ha sido preparado en respuesta a una petición del Comité de Pesca (COFI), el cual, en su 27º período de sesiones, solicitó al Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO (FI) emprender un estudio analítico exploratorio para identificar los principales problemas vinculados con el cambio climático y la pesca. El documento contiene los tres estudios técnicos exhaustivos en los cuales se basaron las discusiones del Taller de expertos de la FAO sobre las consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura, celebrado del 7 al 9 de abril de 2008 en la Sede de la FAO. Las conclusiones y recomendaciones del taller se han recogido en el Informe de Pesca N° 870 de la FAO, publicado en 2008.

Los tres estudios que componen esta publicación presentan una visión de conjunto de los conocimientos actuales sobre las posibles consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura. El primero trata de la variabilidad y el cambio climático y sus consecuencias físicas y ecológicas en los ambientes marinos y de aguas dulces. El segundo se ocupa de las repercusiones del cambio climático en los pescadores y comunidades pesqueras y examina las medidas de adaptación y mitigación que podrían ponerse en ejecución. Por último, el tercero se ocupa específicamente de las repercusiones del cambio climático en la acuicultura y explora las medidas de adaptación y mitigación posibles.

Se reconocen con gratitud los comentarios formulados por los participantes en el taller de expertos para perfeccionar el contenido de los tres estudios técnicos incluidos en este documento.

La organización del taller de expertos y la publicación de este documento técnico fueron financiadas por los Gobiernos de Italia y de Noruega mediante actividades relacionadas con la Conferencia de Alto Nivel de la FAO sobre la Seguridad Alimentaria Mundial: los Desafíos del Cambio Climático y la Bioenergía (Roma, 3-5 de junio de 2008).

La traducción al Español se realizó con la contribución del Fondo Fiduciario Japonés del proyecto: "Manejo y conservación de las pesquerías en el contexto de un ecosistema cambiante".

Resumen

Los tres estudios técnicos presentados y discutidos en el Taller de expertos sobre las consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura (Roma, 7-9 de abril de 2008) exponen una visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos sobre las consecuencias del cambio climático en la pesca y la acuicultura. La Introducción de documento técnico presenta un resumen de los resultados del taller y las conclusiones sobre los efectos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos y en los medios de vida relacionados con la pesca y la acuicultura. .

El primer estudio examina las repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en las pesquerías de captura marina y continental y en la acuicultura. El estudio comienza con una revisión de los efectos físicos del cambio climático en los sistemas marinos y de aguas dulces para luego relacionar estos cambios con los efectos observados en los procesos de producción pesquera. Partiendo de estudios de casos realizados en diferentes regiones y ecosistemas, se bosquejan diversas hipótesis referidas a las consecuencias del cambio climático para la producción pesquera y los ecosistemas.

El segundo estudio se ocupa de los efectos del cambio climático en las pesquerías y comunidades pesqueras analizando la exposición, susceptibilidad y vulnerabilidad de las pesquerías y proponiendo algunos ejemplos de mecanismos de adaptación actuales a que se ha recurrido en el sector. Se examina la contribución de las actividades pesqueras a las emisiones de gases de efecto invernadero y se sugieren ejemplos de estrategias de mitigación. También se investiga el papel de la política pública y de las instituciones en la promoción de las medidas de adaptación al cambio climático y de mitigación de sus efectos.

Por último, el tercer estudio se ocupa de los efectos del cambio climático en la acuicultura. El estudio entrega una visión general de la producción de peces mediante la acuicultura y una síntesis de los trabajos hasta ahora realizados sobre los efectos del cambio climático en la acuicultura y en las pesquerías. El trabajo está enfocado en las repercusiones directas e indirectas –en términos de biodiversidad, enfermedades de los peces y producción de harina de pescado– del cambio climático en la acuicultura. Asimismo, se estudia la contribución de la acuicultura al cambio climático (emisiones y absorción de carbono) y las posibles medidas de adaptación y mitigación que se podrían aplicar.

Cochrane, K.; De Young, C.; Soto, D. y Bahri, T. (eds).

Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos.

FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura. No 530. Roma. FAO. 2012. 237 p.

Índice

Preparación de este documento	iii
Resumen	iv
Repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en la pesca de captura marina y continental y en la acuicultura	7
(M. Barange y I. Perry)	
El cambio climático y la pesca de captura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación	119
(T. Daw, W.N. Adger, K. Brown y M.C. Badjeck)	
El cambio climático y la acuicultura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación	169
(S.S. De Silva y D. Soto)	

Introducción

ANTECEDENTES GENERALES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Desde la publicación en 2007 del cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las amenazas del cambio climático para la sociedad humana y los ecosistemas naturales se han convertido en asuntos de la más alta prioridad. Aunque la importancia de la pesca y la acuicultura suele ser infravalorada, las consecuencias del cambio climático para estos sectores y para las comunidades costeras y ribereñas en general son difíciles de desconocer. Al mismo tiempo, las actividades pesqueras y acuícolas contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero, si bien de forma relativamente atenuada, y ofrecen algunas oportunidades para acciones de mitigación.

Desde lo local hasta lo mundial, la pesca y la acuicultura desempeñan funciones fundamentales en el suministro de alimentos, en la seguridad alimentaria y en la generación de ingresos. Unos 43,5 millones de personas trabajan directamente en el sector pesquero y la gran mayoría de ellas viven en países en desarrollo. Sumando a esta cifra la de quienes intervienen en las industrias afines de elaboración, comercialización, distribución y suministro, el sector sostiene la subsistencia de cerca de 200 millones de personas.

Los alimentos acuáticos tienen una elevada calidad nutricional y aportan en promedio un 20 por ciento o más de la ingesta de proteínas animales per cápita a más de 1 500 millones de personas que en su mayor parte viven en países en desarrollo. Estos alimentos son también los productos más ampliamente comercializados y representan componentes esenciales de las ganancias de exportación de muchos de los países más pobres. El sector tiene especial importancia para los pequeños Estados insulares, que dependen de la pesca y la acuicultura para suplir al menos el 50 por ciento de sus necesidades de proteínas animales.

Según las proyecciones, el cambio climático repercutirá ampliamente en los ecosistemas, las sociedades y las economías y aumentará la presión sobre los medios de vida y el suministro de alimentos, incluidos los alimentos que provienen del sector de la pesca y la acuicultura. La calidad de los alimentos tendrá un papel muy importante ya que la presión a que serán sometidos los recursos alimenticios será mayor, y ello determinará que la disponibilidad y acceso a los recursos pesqueros se convierta en una cuestión de desarrollo cada vez más crítica.

El sector pesquero difiere del sector agrícola convencional por las interacciones y necesidades específicas que lo vinculan a los problemas planteados por el cambio climático. La pesca de captura presenta rasgos propios en lo que respecta a la cosecha de los recursos naturales y a sus nexos con los procesos ecosistémicos mundiales. La acuicultura complementa los suministros alimentarios y contribuye considerablemente a su incremento, y, aunque por sus interacciones se parece más a la agricultura, tiene asimismo importantes conexiones con la pesca de captura.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), reconociendo la probabilidad de los cambios que se avecinan y las interacciones entre la pesca y la acuicultura, la agricultura y las actividades forestales y los mencionados cambios, celebró del 3 al 5 de junio de 2008 en su Sede en Roma, una Conferencia de Alto Nivel sobre la Seguridad Alimentaria Mundial: los Desafíos del Cambio Climático y la Bioenergía. La conferencia abordó las cuestiones relativas a la

¹ FAO. 2008. Report of the FAO Expert Workshop on Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture. Rome, Italy, 7–9 April 2008. *FAO Fisheries Report*. No. 870. Rome, FAO. 2008. 32p.

seguridad alimentaria y la reducción de la pobreza ante los problemas relacionados con el cambio climático y la seguridad energética.

Entre el 7 y el 9 de abril de 2008, el Departamento de Pesca y Acuicultura (FI) de la FAO organizó un Taller de expertos sobre las consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura¹, con el objeto de proporcionar a la conferencia de la FAO información coherente y de elevada calidad sobre las cuestiones de la pesca y la acuicultura y el cambio climático. El taller produjo aportes que fueron presentados a la Conferencia de Alto Nivel, y sus trabajos representan la respuesta a la petición del Comité de Pesca de la FAO (COFI), en su 27º período de sesiones, para que «la FAO emprendiese un estudio analítico exploratorio para identificar las cuestiones clave relativas al cambio climático y a la pesca, iniciase un debate acerca de las formas en que la industria pesquera puede adaptarse al cambio climático, y asumiese un papel protagónico en la difusión de informaciones a pescadores y encargados de la formulación de las políticas sobre las consecuencias probables del cambio climático para las pesquerías».

CONCLUSIONES DEL TALLER DE EXPERTOS SOBRE LAS CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA PESCA Y LA ACUICULTURA (ROMA, 7-9 DE ABRIL DE 2008)

El propósito del Taller de expertos fue identificar y examinar los asuntos clave planteados por el cambio climático y su relación con la pesca y la acuicultura, partiendo de las alteraciones físicas y de sus repercusiones en los recursos acuáticos y en los ecosistemas, y la forma en que afectan a las dimensiones humanas y a los esfuerzos de adaptación de los individuos para enfrentar los problemas que se advierten en el ámbito de la pesca y la acuicultura. Para facilitar los debates de los expertos, se elaboró tres exhaustivos documentos técnicos de antecedentes que se incluyen en la presente publicación:

- *Repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en la pesca de captura marina y continental y en la acuicultura*, por Manuel Barange y Ian Perry;
- *El cambio climático y la pesca de captura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación*, por Tim Daw, Neil Adger, Katrina Brown y Marie-Caroline Badjeck;
- *El cambio climático y la acuicultura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación*, por Sena S. De Silva y Doris Soto.

Uno de los mensajes esenciales de los debates, que emergió del análisis de los documentos, es que el cambio climático representa una amenaza compleja para la sostenibilidad de la pesca de captura y para el desarrollo de la acuicultura. Sus repercusiones resultan del calentamiento gradual y los cambios físicos relacionados, y de la frecuencia, intensidad y localización de los acontecimientos extremos. Los efectos tienen lugar en el contexto de otros fenómenos socioeconómicos mundiales y se traducen en presiones sobre los recursos naturales. El taller produjo un bosquejo de las principales repercusiones observadas en los ecosistemas y en los medios de vida y sus implicaciones en la seguridad alimentaria. Se requiere medidas urgentes de adaptación en respuesta a las oportunidades y las amenazas a la provisión de alimentos y medios de subsistencia debido a las variaciones climáticas.

Impactos ecosistémicos

El taller llegó a la conclusión de que el cambio climático está ocasionando modificaciones físicas y biológicas en la distribución de las especies marinas y de aguas dulces. En general, se registra un desplazamiento hacia los polos de las especies de aguas templadas con los consiguientes cambios en el tamaño y productividad de sus hábitats. Es probable que en un mundo que se está calentando la productividad de los ecosistemas

¹ FAO. 2008. *Report of the FAO Expert Workshop on Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture*. Roma, Italia, 7-9 de abril de 2008. FAO Informe de Pesca. N° 870. Roma. 32 p.

se reduzca en la mayor parte de los océanos tropicales y subtropicales, en los mares y en los lagos, pero que aumente en las zonas latitudinales altas. El incremento de las temperaturas también afectará la fisiología de los peces, y, según las regiones y latitudes, tendrá efectos tanto positivos como negativos en las pesquerías y en las actividades acuícolas.

Al causar trastornos en las redes tróficas marinas y de aguas dulces, el cambio climático está ya alterando la estacionalidad de algunos procesos biológicos, con consecuencias imprevisibles para la producción pesquera. El riesgo de invasiones de especies y la difusión de enfermedades de transmisión vectorial representan motivos adicionales de preocupación.

El calentamiento diferencial de las tierras y océanos y de las regiones polares y tropicales afectará la intensidad, frecuencia y estacionalidad de las pautas climáticas (por ejemplo, el fenómeno de El Niño) y determinará acontecimientos extremos (tales como inundaciones, sequías y tormentas). Estos eventos alterarán la estabilidad de los recursos marinos y de aguas dulces en esas regiones.

La elevación del nivel de los mares, el derretimiento de los glaciares, la acidificación de los océanos y los cambios en las precipitaciones y en el flujo de las aguas subterráneas y los ríos tendrán efectos significativos en los arrecifes de coral, los humedales y los ríos, lagos y estuarios, y requerirán implantar medidas de adaptación que permitan tanto sacar provecho de las oportunidades como minimizar las repercusiones perjudiciales en las pesquerías y en la acuicultura.

Repercusiones en los medios de vida

El taller observó que los cambios en la distribución, en la composición de las especies y en los hábitats harán necesario modificar las prácticas pesqueras y las operaciones en el sector de la acuicultura, y modificar la ubicación de las instalaciones de desembarque, cosecha y elaboración.

Los acontecimientos extremos también tendrán consecuencias en la infraestructura, que se manifestarán desde los puntos de desembarque y cosecha hasta las plantas de elaboración poscosecha y las vías de transporte. Habrá igualmente repercusiones en el ámbito de la seguridad en el mar y en los asentamientos humanos, siendo las comunidades que viven en las tierras bajas las que correrán los mayores riesgos.

Las actividades acuícolas y la producción de las pesquerías continentales se verán afectadas por el estrés hídrico y la competencia por los recursos de aguas, factores que acentuarán probablemente los conflictos en el sector de los empleos que dependen del acceso al agua.

Debido a los cambios en la cronología de las actividades pesqueras, será probablemente necesario modificar las estrategias relacionadas con los medios de vida, por ejemplo en cuanto a pautas de migración de pescadores.

Tanto dentro como fuera del sector pesquero, la reducción de las opciones relacionadas con los medios de vida se traducirá en cambios en el empleo, que a su vez podrán ocasionar una presión social más intensa. La diversificación de los medios de vida constituye un procedimiento consolidado para la transferencia y contención de riesgos ante las perturbaciones, pero cuando las alternativas de diversificación son escasas, la factibilidad de tal procedimiento aparece comprometida.

En los mercados y en los sectores de distribución y elaboración, donde actualmente la mujer juega un papel considerable, se registrarán problemas específicos ligados a las cuestiones de género; por ejemplo, la competencia por el acceso a los recursos, el riesgo derivado de los acontecimientos extremos y los cambios en las pautas laborales.

Las consecuencias del cambio climático afectarán a las cuatro dimensiones de la seguridad alimentaria:

- la *disponibilidad* de alimentos de origen acuático variará debido a las alteraciones en los hábitats, las poblaciones ícticas y la distribución de las especies;

- la *estabilidad* de los suministros se verá afectada por irregularidades estacionales, la varianza en la productividad de los ecosistemas, la mayor variabilidad de los suministros y los riesgos;
- el *acceso* a los alimentos de origen acuático se modificará a causa de los cambios en los medios de vida y en las capturas o en las posibilidades de cosecha;
- la *utilización* de los productos acuáticos también tendrá alteraciones, por ejemplo, algunas sociedades y comunidades deberán ajustar sus hábitos de consumo introduciendo en sus comidas especies que no formaban parte de su dieta tradicional.

Huella de carbono de las pesquerías y de la acuicultura

El taller admitió que la contribución de las actividades de pesca y acuicultura a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante la producción y transporte y la elaboración y almacenamiento del pescado es, si bien menor, aun significativa. Según los subsectores y las especies buscadas o cultivadas, la intensidad de las emisiones varía mucho. La vía maestra para mitigar las emisiones pasa por la racionalización del consumo energético y depende del aprovechamiento del combustible y materias primas, aunque, tal como sucede con otros sectores alimentarios, la ordenación de las actividades de distribución y envasado y de algunos componentes de la cadena de suministro también contribuirá a disminuir la huella de carbono del sector.

La generación de gases de efecto invernadero por las actividades pesqueras, la acuicultura y segmentos afines de la cadena de suministro es pequeña si se la compara con otros sectores, pero puede aún ser reducida: existen para ello medidas a las que se puede fácilmente recurrir. En muchos casos, las acciones de mitigación del cambio climático podrían complementar y reforzar las iniciativas en curso para mejorar la sostenibilidad de la pesca y la acuicultura (por ejemplo, reduciendo el esfuerzo pesquero y la capacidad de las flotas con el objeto de limitar el consumo de energía y las emisiones de carbono, y, en el sector de la acuicultura, reduciendo la dependencia de la harina de pescado).

Las innovaciones tecnológicas podrían incluir la reducción del consumo de energía en la pesca y en la producción acuícola y la implantación de sistemas de distribución poscosecha más eficientes. En el sector pueden observarse también interacciones importantes respecto a los servicios medioambientales (por ejemplo, el mantenimiento de la calidad y funciones de los arrecifes de coral, los márgenes costeros y las cuencas hidrográficas continentales), el potencial de absorción de carbono y otras opciones de gestión de nutrientes que necesitan sin embargo ser investigadas y desarrolladas más a fondo. Si la diversidad genética se aprovechase de forma más sostenible –en especial gracias a las biotecnologías–, sería posible lograr ganancias en eficiencia apreciables (por ejemplo, aumentando la producción de las especies de acuicultura poco dañinas, creando sistemas acuícolas o utilizando los materiales derivados de cultivos agrícolas o productos de desecho para la cría de especies acuáticas carnívoras), pero tales ganancias deberán ser evaluadas según criterios sociales, ecológicos y políticos más amplios.

Los gastos de investigación y desarrollo (I+D) relacionados con la mitigación deberán ser justificados comparándolos con los de otros sectores cuyos impactos podrían ser mucho mayores; pero desde ya es posible el desarrollo de políticas para apoyar algunas prácticas más eficientes recurriendo a procedimientos hoy disponibles.

Las posibles repercusiones negativas de las medidas de mitigación en la seguridad alimentaria y en los medios de vida deberán ser entendidas más cabalmente, justificadas cuando sea oportuno, y reducidas cuanto se pueda.

Adaptación al cambio

Aunque a lo largo de la historia las comunidades que dependen de los recursos han conseguido adaptarse al cambio, las alteraciones climáticas previstas harán correr muchos más riesgos a las comunidades que dependen de la pesca, y esto podría limitar

la efectividad de las anteriores estrategias de adaptación. El taller llegó a la conclusión de que las estrategias de adaptación deberán ser diseñadas específicamente en función de cada contexto y lugar, tomando en consideración tanto las repercusiones que ocurran a breve plazo (por ejemplo, el aumento en la frecuencia de acontecimientos severos) como a largo plazo (por ejemplo, reducción en la productividad de los ecosistemas acuáticos). Está claro que en los tres niveles de acciones de adaptación (la comunidad, el país y la región) será necesario –y provechoso– crear capacidades robustecidas mediante acciones de sensibilización sobre los impactos que el cambio climático ejerce en la pesca y la acuicultura, los programas de promoción de educación general y las iniciativas dirigidas, tanto dentro como fuera del sector.

Entre las opciones para aumentar la capacidad de recuperación y adaptación mediante la mejora de la ordenación en los sectores de la pesca y la acuicultura está la adopción, como práctica estándar, de la ordenación adaptativa precautoria. El enfoque ecosistémico de la pesca (EEP) y el enfoque ecosistémico de la acuicultura (EEA) deberán ser adoptados para aumentar la resiliencia de los ecosistemas de recursos acuáticos, de los sistemas de producción pesquera y de acuicultura y de las comunidades que dependen de los recursos acuáticos.

Los sistemas de acuicultura poco o no dependientes de los insumos de harina y aceite de pescado (por ejemplo, bivalvos y macroalgas) tienen mayores probabilidades de expansión que los sistemas productivos que dependen de los productos de la pesca de captura.

Las opciones de adaptación también comprenden la diversificación de los medios de vida y la promoción de los seguros de cultivos acuícolas ante la potencial reducción o la mayor variabilidad de los rendimientos.

Ante la mayor frecuencia de acontecimientos climáticos graves, las estrategias para reducir la vulnerabilidad de las comunidades que se dedican a la pesca o a la cría de peces deberán abordar en especial medidas como: las inversiones y la creación de capacidades para mejorar los pronósticos; los sistemas de alerta temprana; el aumento de la seguridad en los puertos y desembarcaderos; y la seguridad en el mar. De manera más general, las estrategias de adaptación deberían promover la gestión del riesgo de catástrofes, incluida la preparación para hacer frente a casos de catástrofe, y la gestión integrada de las zonas costeras.

Las políticas y programas nacionales de adaptación al cambio climático y de seguridad alimentaria deberán abarcar el sector de la pesca y la acuicultura en su totalidad (o, en caso de no existir, deberán ser diseñadas y puestas en ejecución sin tardar). Esto contribuirá a que los posibles impactos resultantes del cambio climático puedan ser integrados en los planes generales de desarrollo nacional (incluidas las infraestructuras).

Las acciones de adaptación en otros sectores tendrán repercusiones en las pesquerías, en particular en las continentales y en la acuicultura (por ejemplo, infraestructura de irrigación, embalses, escorrentías derivadas del uso fertilizantes), y harán necesario llegar a compromisos atentamente ponderados.

Las interacciones entre los sistemas de producción de alimentos podrían complicar los efectos del cambio climático en los sistemas de producción pesqueros, pero también ofrecer oportunidades. Se podrían por ejemplo fomentar los medios de vida basados en la acuicultura en caso de salinización de las zonas de delta y de la consiguiente pérdida de terrenos agrícolas.

Opciones que facilitan el cambio

El taller contempló opciones de política y actividades a nivel internacional, regional y nacional que pueden contribuir a minimizar las repercusiones negativas del cambio climático, intensificar las acciones de mitigación y prevención y crear y mantener una capacidad de adaptación a dicho cambio. Estas opciones y actividades son las siguientes:

Desarrollo de la base de conocimientos. En el futuro, al elaborar planes para un contexto de incertidumbre, se deberá tomar en cuenta la mayor posibilidad de que ocurran acontecimientos imprevistos, tales como fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes u otros eventos sorpresivos. Sin embargo, las experiencias pasadas en materia de ordenación bajo condiciones de variabilidad y acontecimientos extremos pueden ser útiles para diseñar sistemas robustos de adaptación capaces de responder adecuadamente. Será muy importante disponer de mejores conocimientos en diversos campos, por ejemplo en cuanto a proyecciones futuras respecto a niveles de producción pesquera, predicciones detalladas de las repercusiones en determinadas pesquerías y sistemas de acuicultura, mejores herramientas para la adopción de decisiones en situaciones de incertidumbre, y un conocimiento perfeccionado acerca de quiénes son o serán los sujetos vulnerables al cambio climático y sus efectos adversos sobre la seguridad alimentaria y cómo enfrentar estas alteraciones.

Marcos normativo, jurídico y de ejecución. Para hacer frente a las complejas interacciones del cambio climático y a sus probables repercusiones es necesario introducir en los marcos de gobernanza las respuestas que los diferentes sectores han dado a dicho cambio y sus repercusiones. En el plano nacional, la base para las actuaciones podrá ser el Código de Conducta para la Pesca Responsable y los planes de acción internacional (PAI) relacionados, así como una adecuada vinculación entre los marcos normativo y jurídico y los planes de ordenación. Será necesario establecer nexos entre las políticas y programas nacionales de adaptación al cambio climático y también entre los marcos jurídicos transectoriales, tales como los marcos relativos a la seguridad alimentaria, reducción de la pobreza, preparación para responder a casos de emergencia, y otros. A causa del posible desplazamiento de los recursos acuáticos y de las personas, que resultará de las repercusiones ocasionadas por el cambio climático, será necesario fortalecer las estructuras y procesos regionales vigentes o dar a éstos una orientación más específica. A nivel internacional, los asuntos sectoriales relacionados con el comercio y la competencia también sufrirán probables repercusiones debidas al cambio climático.

Creación de capacidad: estructuras técnicas y organizativas. El diseño de las políticas y la planificación de las acciones en respuesta al cambio climático exige no solo la intervención de los organismos técnicos competentes, tales como las entidades encargadas de la pesca, de asuntos interiores, de la investigación científica y de la educación, sino también la de las que se ocupan de la planificación del desarrollo nacional y de la financiación. Estas instituciones, y los representantes comunales o políticos a nivel subnacional y nacional, deberán también recibir una información dirigida y ser instruidos en materia de creación de capacidad. Será necesario además establecer o reforzar las asociaciones en el seno del sector público y privado, la sociedad civil y las organizaciones no gubernamentales (ONG).

Activar los mecanismos financieros: incorporar los asuntos relativos a la seguridad alimentaria en los mecanismos financieros existentes y en los nuevos mecanismos financieros. Para hacer frente a los problemas del cambio climático, será necesario aprovechar plenamente, a nivel nacional e internacional, las potencialidades de los mecanismos financieros existentes, tales como los de seguros. También será preciso recurrir a enfoques innovadores para seleccionar instrumentos financieros y crear incentivos y desincentivos eficaces. El sector público jugará un papel importante al estimular e integrar las inversiones del sector privado y actuar por conducto de los mecanismos de mercado para satisfacer los objetivos sectoriales relacionados con las respuestas al cambio climático y la seguridad alimentaria. Muchos de estos enfoques son nuevos y deberán ser probados en el sector.

Repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en la pesca de captura marina y continental y en la acuicultura

Manuel Barange
Oficina del Proyecto internacional GLOBEC
Laboratorio marino de Plymouth
Prospect Place
Plymouth PL1 3DH
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte
m.barange@pml.ac.uk

R. Ian Perry
Fisheries and Oceans Canada
Estación Biológica del Pacífico
Nanaimo, B.C. V9T 6N7
Canadá
Ian.Perry@dfo-mpo.gc.ca

Barange, M. y Perry, R.I. 2009. Repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en la pesca de captura marina y continental y en la acuicultura. En K. Cochrane, C. De Young, D. Soto y T. Bahri (eds). Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura, N° 530. Roma, FAO. pp. 7–118.

RESUMEN

En este capítulo se estudian las repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en la pesca de captura marina y continental y en la acuicultura. Se ha observado que los océanos se están calentando, pero que el calentamiento no es homogéneo geográficamente. Se espera que debido al efecto combinado de los cambios de temperatura y de salinidad, resultantes del calentamiento climático, se reduzca la densidad de la superficie del océano, aumente la estratificación vertical y se registren modificaciones en la mezcla de la capa superficial.

Existe evidencia de que las aguas continentales también se están calentando y que ello repercute en la escorrentía de los ríos. Es probable que a consecuencia del incremento de la estratificación vertical y de la estabilidad de la columna de agua en los océanos y lagos se reduzca la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica y que, por lo tanto, en un mundo que se ha rehecho, la producción primaria y secundaria disminuya. Sin embargo, en latitudes altas el tiempo de residencia de las partículas en la zona eufótica aumentará, prolongando la temporada de crecimiento y por ende el incremento de la producción primaria.

Si bien existen indicios de que en las últimas décadas la surgencia costera se ha intensificado, los modelos de circulación global no muestran que dicho fenómeno

obedezca a claras pautas en respuesta al calentamiento global. Sin embargo, los actuales modelos climáticos no han sido desarrollados lo suficiente para resolver las incógnitas relacionados con los fenómenos de surgencia costera, de modo que para entender las repercusiones del cambio climático en los procesos de afloramiento se requieren estudios adicionales.

También se ha demostrado que el cambio climático puede afectar la estacionalidad de las surgencias. El nivel de los mares ha aumentado en todo el mundo a un ritmo creciente, siendo las zonas de mayor riesgo las costas del Atlántico y el Golfo de México de las Américas, el Mediterráneo, el Báltico, las pequeñas regiones insulares, los megadeltas asiáticos y otras áreas costeras urbanas.

A causa de la acidificación de los océanos, el pH de las aguas marinas ha disminuido en 0,1 unidades a lo largo de los últimos 200 años; y de acuerdo con los modelos predictivos se anticipan reducciones de 0,3 a 0,5 unidades durante los próximos 100 años. Las repercusiones de la acidificación de los océanos serán particularmente graves para los organismos conchíferos, los arrecifes de coral tropicales y los corales de aguas frías.

Los efectos del cambio climático en los ecosistemas continentales se suman a los cambios en el uso de la tierra, y se evidenciarán en especial en la carga de sedimentos, los flujos hídricos y otros fenómenos físico-químicos consecuenciales (hipoxia, estratificación, cambios en la salinidad). Los resultados de estos procesos son complejos y se harán sentir en la composición de las comunidades y en la producción y estacionalidad del plancton y las poblaciones de peces. En particular en los países en desarrollo, estas alteraciones presionarán más intensamente los sistemas de producción de alimentos pesqueros continentales y de fuentes terrestres que son grandes consumidores de agua.

Se han constatado muchos efectos del cambio climático en la producción pesquera. Si bien se ha observado una leve reducción en la producción oceánica primaria mundial durante las últimas décadas, se espera un pequeño incremento en la producción mundial primaria a lo largo de este siglo, aunque con fuertes diferencias entre las regiones. Es posible que el grupo de fitoplancton dominante experimente cambios. En términos generales, la cubierta de hielo de los lagos de altura situados en zonas de latitud elevada se reducirá, las aguas serán más cálidas, la temporada de crecimiento se prolongará y la abundancia de algas y la productividad serán mayores. Por el contrario, algunos lagos tropicales experimentarán una menor abundancia de algas y pérdida de productividad, probablemente a causa de una limitada reposición de nutrientes.

Se pronostica que la intensificación de los ciclos hidrológicos influya mucho en los procesos limnológicos acentuando la escorrentía, y que las tasas de descarga, las superficies inundadas y las estaciones secas impulsen la producción en todos los niveles (desde el plancton hasta los peces). Se prevé que debido al cambio climático la mayor parte de las especies terrestres y marinas se desplazarán hacia los polos, ampliando el rango de distribución de las especies de aguas templadas y reduciendo el de las especies de aguas más frías.

Los cambios más rápidos afectarán a las comunidades de especies ícticas pelágicas las que para contrarrestar el calentamiento superficial intensificarán los movimientos verticales. Los períodos de migración de muchos animales han seguido las tendencias decádicas de la temperatura de los océanos, retrasándose durante las décadas frías y adelantándose en hasta uno a dos meses en los años más cálidos. La abundancia de las poblaciones cuyo ámbito de distribución extremo está más cercano a los polos aumentará en concomitancia con las temperaturas más cálidas, mientras que la de las poblaciones situadas en la partes más ecuatoriales de sus zonas de distribución declinará conforme la temperatura aumenta. Más de la mitad de todas las especies terrestres de aguas dulces o marinas estudiadas han mostrado a lo largo de los últimos 20 a 140 años cambios fenológicos mensurables vinculados predominante y sistemáticamente a las modificaciones observadas en los cambios climáticos regionales. Las respuestas diferenciadas de los componentes planctónicos (algunos responden a los cambios de temperatura, otros a la

intensidad luminosa) indican que la trofodinámica de las aguas marinas y de las aguas dulces puede haber sufrido alteraciones debidas a un desajuste en la relación depredador-presa. Existen pocas pruebas de que el aumento de brotes de enfermedades pueda estar vinculado con el recalentamiento mundial, pese a que se ha observado una difusión de patógenos hacia las altas latitudes.

El estudio resume las consecuencias del cambio climático a lo largo de las escalas temporales. A escalas temporales «rápidas» (unos pocos años), se estima, con un nivel de confianza alto, que el incremento de las temperaturas tendrá repercusiones perjudiciales en la fisiología de los peces y que causará menoscabos significativos en la acuicultura, cambios en la distribución de las especies y probables alteraciones en los índices de abundancia relacionados con las perturbaciones de los procesos de reclutamiento. Se esperan cambios en la cronología de los acontecimientos del ciclo biológico, que afectarán en especial a las especies de vida breve, tales como el plancton, los calamares y los peces pelágicos pequeños. A escalas temporales intermedias (de unos pocos años a una década), el estrés fisiológico determinado por la temperatura y las alteraciones fenológicas repercutirán en el funcionamiento de los mecanismos de reclutamiento y por consiguiente en la abundancia de muchas poblaciones marinas y acuáticas, en particular en los extremos de los ámbitos de distribución de las especies menos longevas. A escalas temporales largas (varias décadas), las repercusiones pronosticadas dependerán de los cambios que se registren en la producción primaria neta de los océanos y su transferencia a niveles tróficos más altos, respecto a los cuales se carece de información.

Muchos son aún los puntos inciertos y los vacíos de la investigación, sobre todo en cuanto a los efectos de las interacciones sinérgicas entre agentes estresantes (p. ej., la pesca y la contaminación), la incidencia y funciones de los umbrales críticos y la capacidad de adaptación y evolución de los organismos marinos y acuáticos ante los cambios. En lo que respecta a los sistemas de agua dulce, son motivo de preocupación las variaciones en el ritmo, intensidad y duración de las inundaciones, resultantes del cambio climático, a las que muchas especies de peces han adaptado sus pautas migratorias, de desove y de transporte de los productos de desove.

El capítulo concluye con la descripción de las respuestas anticipadas específicas de los ecosistemas marinos regionales al cambio climático (Ártico, nor-Atlántico, nor-Pacífico, las surgencias costeras, las regiones tropicales y subtropicales, los arrecifes de coral, los sistemas de aguas dulces y los sistemas de acuicultura).

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud a Kevern Cochrane y a Cassandra de Young por habernos brindado la oportunidad de escribir este informe, y por sus valiosos comentarios sobre un primer borrador del mismo. Agradecemos a Iddyia Karunasagar su información sobre los efectos potenciales del cambio climático sobre los patógenos humanos en el ambiente marino. Agradecemos también a los colegas que participaron en el Taller de expertos sobre las consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura (Roma, 7-9 de abril de 2008) por sus comentarios y sugerencias.

ÍNDICE

1. Bases físicas del cambio climático en los sistemas marinos y de aguas dulces	13
1.1 Contenido calórico y temperatura	13
1.1.1 Ecosistemas oceánicos	13
1.1.2 Aguas continentales	14
1.2 Salinidad de los océanos, densidad y estratificación	17
1.3 Circulación oceánica y surgencia costera	18
1.3.1 Circulación meridional de convección (CMC)	19
1.3.2 Surgencia costera	20
1.4 Aumento del nivel del mar	22
1.5 Acidificación y otras propiedades químicas	23
1.6 Intercambios atmósfera-océano y tierras-océano	25
1.7 Patrones de variabilidad climática de baja frecuencia	27
2. Efectos observados de la variabilidad y el cambio climáticos en los procesos del ecosistema y de producción pesquera	30
2.1 Resumen de los procesos fisiológicos, de desove y de reclutamiento susceptibles a la variabilidad climática	31
2.1.1 Efectos fisiológicos del cambio climático en los peces	31
2.1.2 Desove	33
2.1.3 Reclutamiento de peces y cambio climático	33
2.2 Producción primaria	36
2.2.1 Océano Mundial	36
2.2.2 Repercusiones regionales	40
2.2.3 Aguas continentales	43
2.3 Producción secundaria	44
2.4 Cambios en la distribución	47
2.5 Cambios en la abundancia	51
2.6 Cambios fenológicos	53
2.6.1 Ambientes oceánicos	53
2.6.2 Aguas continentales	55
2.7 Invasiones de especies y enfermedades	56
2.8 Repercusiones en la red trófica, desde el plancton hasta los peces	58
2.9 Cambios de régimen y otros acontecimientos ecosistémicos extremos	60
3. Hipótesis sobre las repercusiones del cambio climático en la producción pesquera y en los ecosistemas	65
3.1 Repercusiones generales	65
3.1.1 Escalas temporales rápidas	66
3.1.2 Escalas temporales intermedias	67
3.1.3 Escalas temporales amplias	67
3.2 Estudios de caso	68
3.2.1 Ártico	68
3.2.2 Atlántico septentrional	70
3.2.3 Pacífico septentrional	71
3.2.4 Sistemas de surgencia costeros impulsados por el viento	72
3.2.5 Mares tropicales y subtropicales	73
3.2.6 Arrecifes de coral	74

3.2.7	Sistemas de aguas dulces	76
3.2.8	Sistemas de acuicultura	76
3.3	Factores de incertidumbre y lagunas en la investigación	78
4.	Resumen de las investigaciones	81
4.1	Cambio climático: sus bases físicas en los sistemas marinos y de aguas dulces	81
4.1.1	Contenido calórico y temperatura	81
4.1.2	Salinidad y estratificación	82
4.1.3	Circulación oceánica y surgencia costera	82
4.1.4	Aumento del nivel del mar	82
4.1.5	Acidificación y otras propiedades químicas	82
4.1.6	Intercambios atmósfera-océano y tierra-océanos	83
4.1.7	Patrones de variabilidad climática de baja frecuencia	83
4.2	Efectos observados de la variabilidad y el cambio climático en los procesos ecosistémicos y en la producción pesquera	83
4.2.1	Resumen de los procesos fisiológicos, de desove y de reclutamiento susceptibles a la variabilidad climática	83
4.2.2	Producción primaria	83
4.2.3	Producción secundaria	84
4.2.4	Cambios en la distribución	84
4.2.5	Cambios en la abundancia	84
4.2.6	Cambios fenológicos	85
4.2.7	Invasiones de especies y enfermedades	85
4.2.8	Repercusiones en la cadena trófica, desde el zooplancton hasta los peces	85
4.2.9	Cambios de régimen y otros eventos ecosistémicos extremos	85
4.3	Hipótesis de las repercusiones del cambio climático en la producción pesquera y en los ecosistemas	86
	Bibliografía	93

1. BASES FÍSICAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SISTEMAS MARINOS Y DE AGUAS DULCES

A consecuencia de los cambios climáticos y de otras alteraciones antropogénicas, se han observado en los últimos años numerosas variaciones de largo plazo en el forzamiento físico a escala mundial, regional y de las cuencas hidrográficas. Las repercusiones observadas de tales modificaciones en los procesos biológicos que sustentan la producción íctica y de las pesquerías en los ecosistemas marinos y de aguas dulces pueden servir de indicadores sustitutivos para estimar otros efectos resultantes del cambio climático mundial. Estos factores físicos comprenden la circulación atmosférica, los patrones de intensidad y variabilidad, las corrientes oceánicas y la mezcla, la estratificación, los ciclos hidrológicos y los patrones estacionales.

1.1 Contenido de calor y temperatura

1.1.1 Ecosistemas oceánicos

Los océanos juegan un papel importante en la regulación del clima. Su capacidad calórica (y por lo tanto la absorción de calor neta) es alrededor de 1 000 veces superior a la de la atmósfera. En el medio oceánico, las actividades biológicas interactúan de forma considerable con los procesos físicos dando origen a circuitos de retroalimentación de diversa índole. Por ejemplo, la absorción de calor por el fitoplancton influye tanto en el estado promedio y transitorio del clima ecuatorial (véase Murtugudde *et al.*, 2002; Timmermann y Jin, 2002; Miller *et al.*, 2003) como en el campo de temperatura promedio mundial de la superficie del mar (Frouin y Lacobellis, 2002).

Las opiniones concuerdan en cuanto a que el océano Mundial se ha recalentado considerablemente desde 1955 y que al recalentamiento ha causado más del 80 por ciento de los cambios registrados en el contenido de energía del sistema climático de la Tierra durante este período (Levitus, Antonov y Boyer, 2005; Domingues *et al.*, 2008, Figura 1). Los estudios han atribuido estos cambios a factores antropogénicos (Bindoff *et al.*, 2007), y se ha indicado que en los modelos del cambio climático se ha subestimado la cantidad de calor absorbido por los océanos durante los últimos 40 años (Domingues *et al.*, 2008). Si bien el mundo tiende al recalentamiento, se han observado variaciones decádicas significativas en las series cronológicas mundiales (Figura 2), existiendo por el contrario grandes regiones donde los océanos se están enfriando (Bindoff *et al.*, 2007). P. ej., Harrison y Carson (2007) han observado una acentuada variación espacial en las tendencias de 51 años en el océano superior, que muestran que algunas regiones se han enfriado más de 3 °C, y que otras han registrado un calentamiento de magnitud equivalente. Los autores concluyeron que había que prestar más atención a las estimaciones de los factores de incertidumbre respecto a las tendencias térmicas promedio registradas en las cuencas y el océano Mundial.

Las observaciones indican que el calentamiento es generalizado por encima de los 700 m superiores del océano Mundial, pero que la penetración térmica ha sido más profunda en el océano Atlántico (hasta los 3 000 m) que en los océanos Pacífico, Índico y Meridional debido a la circulación de convección profunda que tiene lugar en el Atlántico septentrional (Levitus, Antonov y Boyer, 2005). Al menos dos mares en latitudes subtropicales (el Mediterráneo y el mar de Japón y China oriental) también se están recalentando.

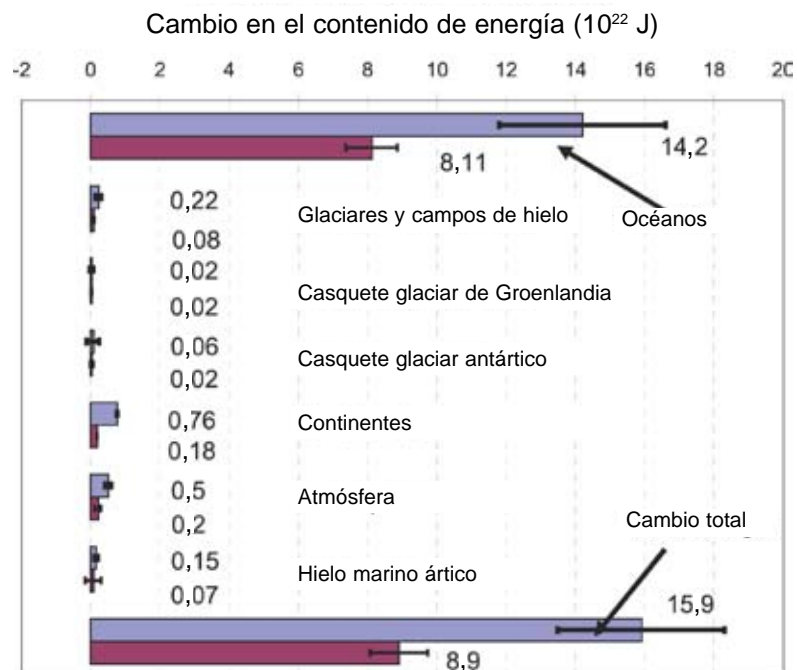
Se ha predicho que aun si todos los agentes de radiación de forzamiento se hubiesen mantenido constantes en el nivel que habían alcanzado en el año 2000, el recalentamiento atmosférico habría continuado a un ritmo de cerca de 0,1 °C por década debido a la lenta respuesta de los océanos. Las pautas geográficas del recalentamiento atmosférico proyectado evidencian que los mayores aumentos de temperatura se registran sobre las tierras (aproximadamente el doble del aumento de la temperatura promedio mundial) y en las altas latitudes septentrionales, y que un menor recalentamiento ocurre encima de los océanos meridionales y el Atlántico Norte (Meehl *et al.*, 2007).

1.1.2 Aguas continentales

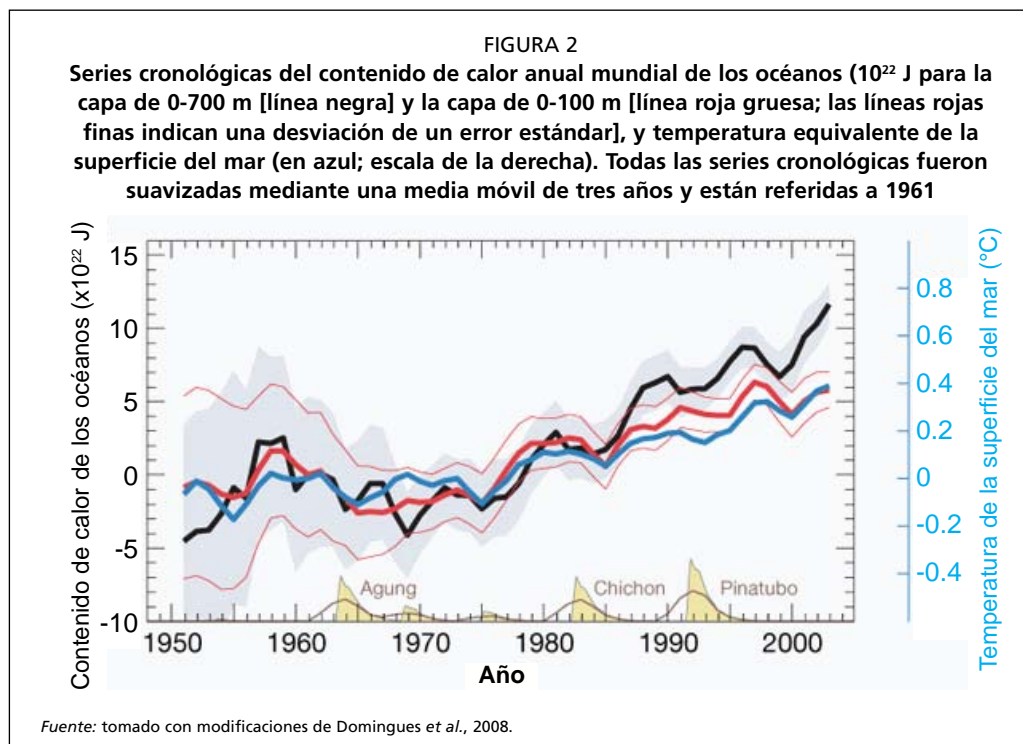
El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha examinado las consecuencias de los cambios climáticos proyectados para los sistemas de aguas dulces, concluyendo que, en general, los recursos dulceacuícolas son vulnerables a las repercusiones del cambio climático y pueden verse muy afectados por ellas. Los cambios esperados comprenden (Kundzewicz *et al.*, 2008): disminuciones de entre el 10 y el 30 por ciento de la escurrentía fluvial promedio en las latitudes medias y en los trópicos secos para mediados de siglo, pero incrementos de 10 a 40 por ciento en las latitudes altas y en los trópicos húmedos (Milly, Dunne y Vecchia, 2005); variaciones en la forma de las precipitaciones, que de nevosas pasarán a ser lluviosas, y un consiguiente cambio en la cronología de los flujos fluviales máximos; y cambios en la frecuencia e intensidad de las inundaciones y sequías. La evaluación del IPCC también afirma que las repercusiones del cambio climático y la efectividad de las acciones de adaptación dependerán de las condiciones locales, comprendidas las condiciones socioeconómicas y de presiones de otro tipo sobre los recursos hídricos (Kundzewicz *et al.*, 2008). Se pronostica que las pautas de cambio de las temperaturas de las aguas continentales

FIGURA 1

Cambios en el contenido de energía de diferentes componentes del sistema Tierra durante dos períodos (1961-2003, en azul, y 1993-2003, en borgoña). Los valores del cambio en el contenido de calor oceánico han sido tomados de Levitus, Antonov y Boyer (2005); los del contenido de calor continental, de Beltrami *et al.* (2002); los del contenido de energía atmosférica están basados en Trenberth *et al.* (2001); y los de liberación de hielo marino ártico han sido tomados de Hilmer y Lemke (2000); el resto de los datos son del IPCC (2007). Un cambio positivo en el contenido de energía significa un aumento de la energía almacenada. Todos los errores de estimación están referidos a un intervalo de confianza del 90 por ciento. No se dispone de estimaciones de confianza para los incrementos de calor continental. Algunos de los resultados se han indicado a escala derivándolos de datos publicados para los dos períodos respectivos. El cambio en el contenido de calor del océano para el período 1961 a 2003 corresponde a la capa de 0 a 3 000 m. El período 1993 a 2003 corresponde a la capa de 0 a 700 m (o 750 m) y se ha calculado como promedio de las tendencias indicadas por Ishii *et al.* (2006), Levitus, Antonov y Boyer (2005) y Willis, Roemmrich y Cornuelle (2004)



Fuente: Bindoff *et al.*, 2007.



seguirán los cambios registrados sobre las superficies de tierras, las cuales se están recalentando a un promedio superior a la media atmosférica mundial debido a que la cantidad de agua disponible para el enfriamiento por evaporación es menor y a que, en comparación con los océanos, la inercia térmica es más baja (Christensen *et al.*, 2007).

Desde el decenio de 1960, las temperaturas de las aguas superficiales han aumentado entre 0,2 y 2 °C en los lagos y ríos de Europa, América del Norte y Asia (Rosenzweig *et al.*, 2007). El incremento de la temperatura de las aguas y estaciones más largas libres de hielo influyen en la estratificación térmica. A consecuencia de la mayor estabilidad térmica, en varios lagos de Europa y de América del Norte el período de estratificación se ha anticipado en hasta 20 días y se ha prolongado dos a tres semanas (Rosenzweig *et al.*, 2007; O'Reilly *et al.*, 2003).

El 90 por ciento de la pesca continental se realiza en África y Asia (FAO, 2006), y por consiguiente se resumen a continuación las repercusiones físicas probables del cambio climático en esas regiones. El recalentamiento en África será presumiblemente más acentuado que el recalentamiento mundial medio a través de todo el continente y durante todas las estaciones, recalentándose algunas de las regiones subtropicales secas más que los trópicos húmedos. La pluviosidad anual disminuirá probablemente en la mayor parte del África mediterránea y el norte del Sahara, siendo más probable que la disminución de la pluviosidad sea progresivamente mayor a proximidad de la costa mediterránea. En África meridional, la pluviosidad se reducirá probablemente en la mayor parte de la región lluviosa invernal y en los márgenes occidentales. En África oriental es probable que la pluviosidad anual media aumente. No se sabe con exactitud cuál será la evolución de las pautas de pluviosidad en el Sahel, la costa de Guinea y el Sahara meridional (Christensen *et al.*, 2007).

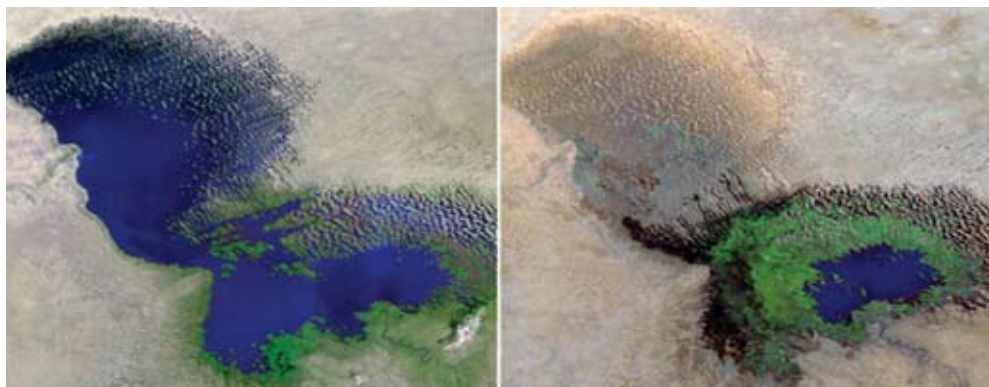
Es probable que el recalentamiento superará en mucho la media mundial en Asia central, la meseta tibetana y Asia septentrional, estará por encima de la media mundial en Asia oriental y Asia meridional, y será similar a la media mundial en Asia sudoriental. Las precipitaciones durante el invierno boreal aumentarán muy probablemente en Asia septentrional y en la meseta tibetana, y aumentarán probablemente en Asia oriental y las zonas sureñas de Asia sudoriental. Durante el verano, las precipitaciones aumentarán probablemente en Asia septentrional, oriental y meridional y en la mayor parte de Asia

sudoriental, pero disminuirán probablemente en Asia central. Es muy probable que las olas de calor de verano sean más prolongadas, más intensas y más frecuentes en Asia oriental. Es muy probable que se registren menos días muy fríos en Asia oriental y Asia meridional. Es muy probable que la frecuencia de los fenómenos de precipitaciones intensas sea mayor en algunas partes de Asia meridional y en Asia oriental. Es probable que las lluvias extremas y los vientos asociados con los ciclones tropicales aumenten en Asia oriental, sudoriental y meridional. Pese a una tendencia al debilitamiento de los propios flujos monzónicos, la circulación monzónica tenderá a determinar un aumento de las precipitaciones debido a la intensificación de la convergencia de humedad. No obstante, muchos aspectos de las respuestas del clima tropical siguen siendo inciertas (Christensen *et al.*, 2007).

Las temperaturas de las aguas continentales están estrechamente relacionadas con la dinámica del ciclo hidrológico. En términos generales, durante el siglo XX se realizaron muchos estudios sobre la tendencia de los flujos fluviales y el nivel de los lagos en escalas que iban desde la cuenca de captación hasta lo mundial. Algunos de estos estudios desvelaron tendencias significativas, tales como la elevación del nivel de las aguas en respuesta al aumento del derretimiento de la nieve y los deshielos, o disminuciones debidas a los efectos combinados de la sequía, el calentamiento y las actividades humanas (Rosenzweig *et al.*, 2007). En general, no se ha informado de ninguna tendencia mundial homogénea (Rosenzweig *et al.*, 2007). La variación en los flujos fluviales de un año a otro se ve fuertemente influenciada en algunas regiones por los patrones de los grandes fenómenos de circulación atmosférica asociados con la Oscilación del Sur El Niño (ENSO, por sus siglas en Inglés), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en Inglés) y otros sistemas de variación decádica. A escala mundial, existen pruebas de un patrón de cambios muy coherente de escorrentía anual, conforme al cual algunas regiones experimentan un incremento en las zonas de latitudes más altas y una disminución en algunas partes de África occidental, Europa meridional y América Latina meridional (Milly, Dunne y Vecchia, 2005). Labat *et al.* (2004) aseguran que a lo largo del siglo XX el aumento de la escorrentía mundial total ha sido del 4 por ciento por un incremento de la temperatura de 1 °C, y con variaciones regionales en torno a esta tendencia. Sin embargo esta afirmación ha sido cuestionada (Legates, Lins y McCabe, 2005) a causa de los efectos ejercidos en la escorrentía por factores no climáticos y a un sesgo debido los escasos puntos de datos.

FIGURA 3

Comparación entre el área y el volumen del lago Chad en 1973 y 1987. El lago Chad, que suministra agua a Chad, Camerún, Níger y Nigeria, era en otros tiempos uno de los lagos más extensos de África. Los grandes proyectos de irrigación, la invasión de arenas del desierto y un clima cada vez más árido han determinado que el lago se haya reducido al 5 por ciento de su tamaño anterior



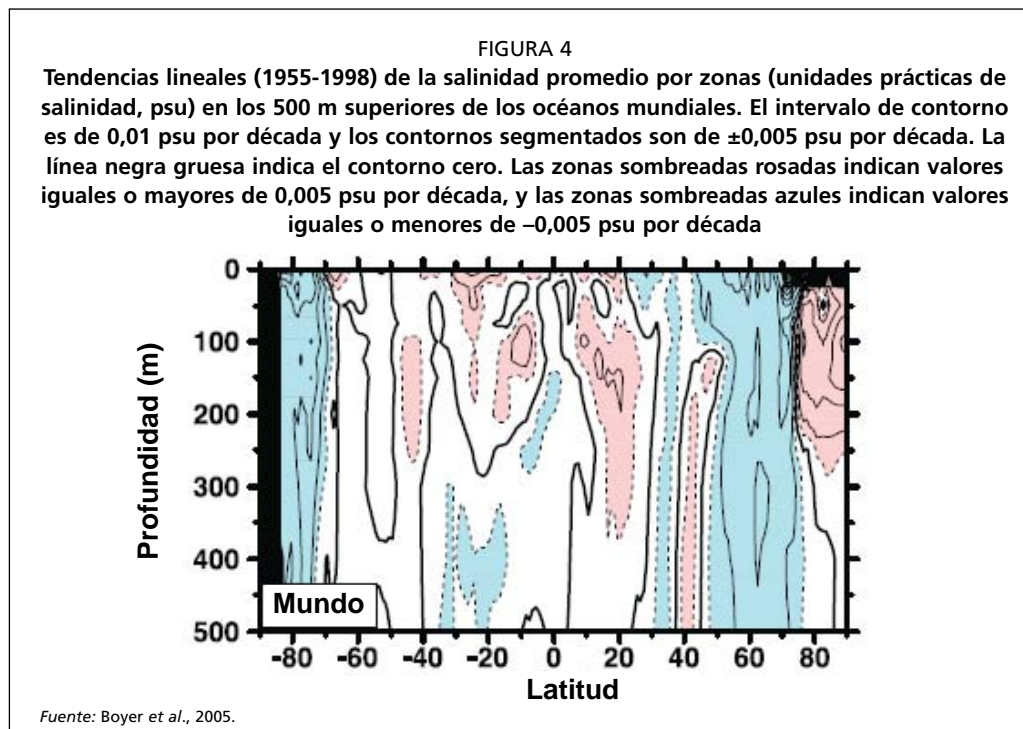
Fuente: Centro de vuelo espacial Goddard de la NASA (www.gsfc.nasa.gov).

En las últimas décadas, el tamaño de varios lagos ha disminuido en todo el mundo, principalmente a causa del uso del agua por el hombre. Para algunos autores, la merma de las precipitaciones también ha sido una causa significativa; por ejemplo, en el caso del lago Chad (Coe y Foley, 2001; Figura 3). En términos generales, el recalentamiento atmosférico está contribuyendo a que las lluvias se reduzcan en las zonas subtropicales y a que aumenten en altitudes altas y en algunas partes de los trópicos. Sin embargo, la razón fundamental de la contracción de la superficie de las aguas continentales es el uso del agua por el hombre y el drenaje (Christensen *et al.*, 2007).

Según las predicciones, para 2100 se registrarán repercusiones negativas importantes en el 25 por ciento de los ecosistemas acuáticos continentales africanos (hipótesis de emisiones SRES B1, De Wit y Stankiewicz, 2006), que se evidenciarán en el deterioro tanto de la calidad del agua como de los bienes y servicios del ecosistema. Como por lo general resulta difícil y costoso controlar los regímenes hidrológicos, la situación de interdependencia entre cuencas de captación a través de las fronteras nacionales deja poco margen para poner en práctica acciones de adaptación.

1.2 Salinidad de los océanos, densidad y estratificación

Las variaciones de salinidad de los océanos son un indicador indirecto pero potencialmente sensible de varios procesos relacionados con el cambio climático, tales como las precipitaciones, la evaporación, la escorrentía fluvial y el derretimiento de los hielos, aunque los datos respecto a estas variaciones son mucho más escasos que para las variaciones de temperatura. La Figura 4 muestra las tendencias de la salinidad promedio por zonas en los 500 m superiores del océano Mundial para períodos de cinco años desde 1955 hasta 1998 (Boyer *et al.*, 2005). En síntesis, durante los últimos 50 años se han observado cambios en el índice de salinidad de los océanos en las girocorrientes y en las cuencas; y ha aumentado, en casi todos los océanos y cuencas, la salinidad de las aguas más cercanas a la superficie en las regiones donde la evaporación es más intensa, mientras que las zonas de altas latitudes han mostrado una tendencia decreciente debido a las más fuertes precipitaciones, a la intensificación de la escorrentía, al derretimiento de los hielos y a la advección. Los indicios generales apuntan a que el océano Mundial se está refrescando (Antonov, Levitus y Boyer, 2002),



pero de forma muy diferenciada según las regiones. La salinidad va en aumento en la superficie del océano Noratlántico subtropical (15-42°N), mientras que más al norte se constata una tendencia al refrescamiento. El océano Meridional muestra débiles signos de refrescamiento. El refrescamiento también ocurre en el Pacífico, salvo en los 300 m superiores y en la girocorriente subtropical, donde la salinidad está aumentando. En el océano Índico, la salinidad está por lo general aumentando en las capas superiores (Bindoff *et al.*, 2007). Aunque la escasez de datos no permite a los autores del presente estudio formular conclusiones más definitivas, el evidente refrescamiento del océano Mundial parece deberse a un incremento de la actividad del ciclo hidrológico (Bindoff *et al.*, 2007).

Las predicciones respecto a las pautas de salinidad de un océano más caliente son congruentes con las observaciones. Sarmiento *et al.* (2004) esperaban cambios en la salinidad que resultarían del acrecentamiento del ciclo hidrológico, producto del aumento de la capacidad de contención de humedad del aire que se ha calentado. El efecto combinado de las variaciones de salinidad y temperatura sería una reducción general de densidad en la capa superficial que da origen al aumento esperado de la estratificación vertical y a cambios en la mezcla superficial (Sarmiento *et al.*, 2004). En la mayor parte del océano Pacífico, el recalentamiento superficial y el refrescamiento actúan en la misma dirección y contribuyen a reducir la mezcla, tal como lo indican las observaciones regionales (Freeland *et al.*, 1997; Watanabe *et al.*, 2005). En los océanos Atlántico e Índico, las tendencias de salinidad y temperatura actúan por lo general en sentidos opuestos, pero los cambios en la mezcla no han sido cuantificados adecuadamente.

Las modificaciones en el hielo marino son uno de los principales factores que intervienen en las mencionadas pautas de salinidad de un océano más cálido. De acuerdo con las proyecciones y conforme a todas las hipótesis de emisiones, los hielos marinos se reducirán tanto en el Ártico como en el Antártico durante el siglo XXI, pero siguiendo una amplia gama de respuestas según los modelos utilizados (Meehl *et al.*, 2007). Con arreglo a algunas proyecciones, el hielo marino ártico de postrimerías de verano habrá desaparecido para 2030 (Stroeve *et al.*, 2007).

Históricamente, en el Atlántico septentrional se han registrado fuertes cambios de salinidad asociados con cambios esporádicos en los aportes de agua dulce y con el índice de Oscilación del Atlántico Norte. Las grandes anomalías de salinidad (Dickson *et al.*, 1988) son consecuencia del reforzamiento de la girocorriente subpolar durante las fases positivas de la Oscilación del Atlántico Norte, y en la región subpolar central éstas causan una menor salinización de la capa superficial. Tres de estas anomalías han sido documentadas entre 1968 y 1978, en el decenio de 1980 y en el decenio de 1990 (Houghton y Visbeck, 2002).

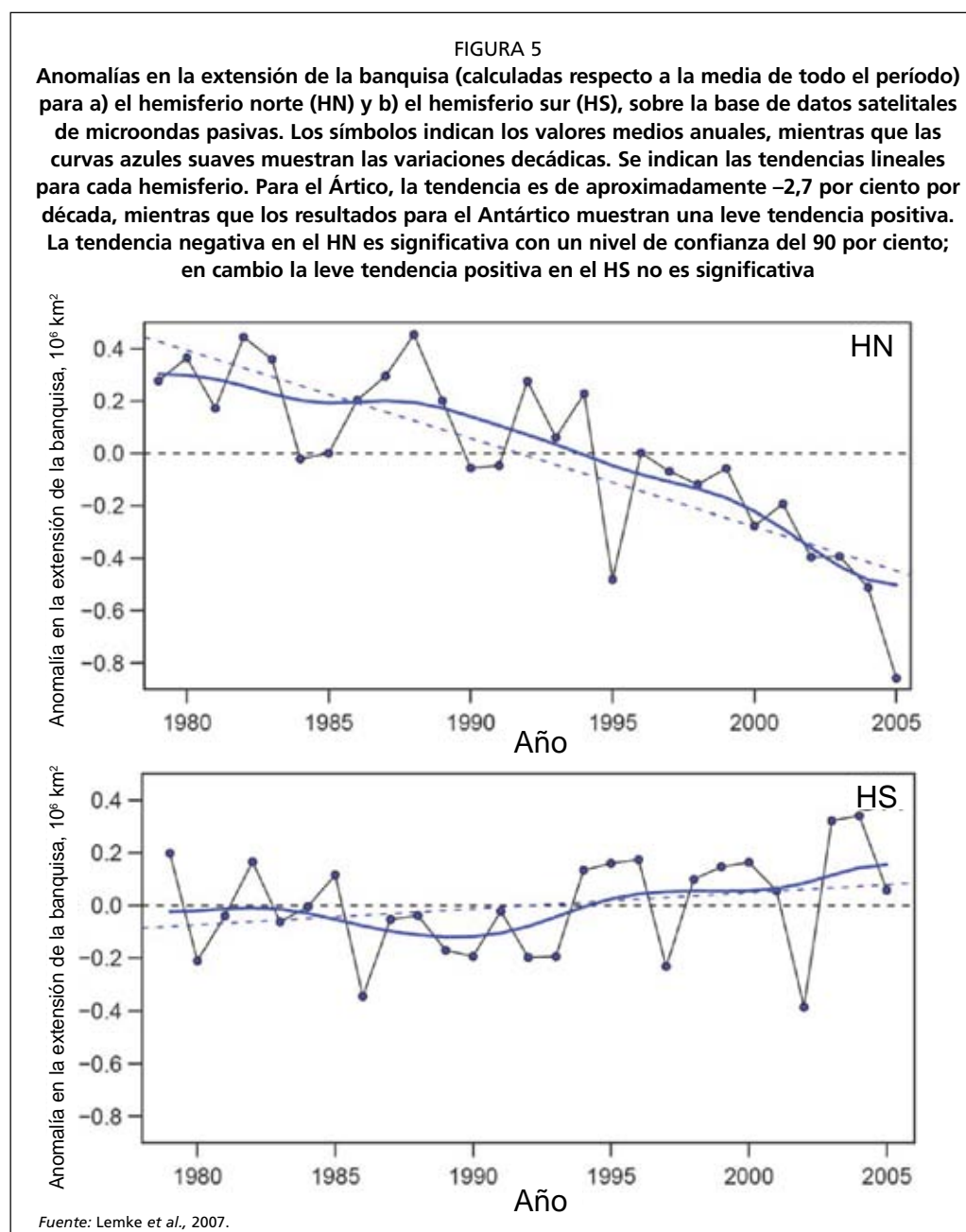
1.3 Circulación oceánica y surgencia costera

Los cambios observados y pronosticados en el contenido de calor y de salinidad de los océanos afectan y seguirán afectando las pautas de circulación. Una descripción exhaustiva de sus repercusiones actuales y potenciales está más allá del alcance de este estudio; para más detalles, se recomienda al lector consultar el correspondiente Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (Bindoff *et al.*, 2007). No obstante, se discutirán aquí dos temas específicos vinculados a la circulación: los cambios posibles que se registrarán en la circulación meridional de convección en el Atlántico Norte, ya que sus efectos podrían ser extremos; y las pautas de largo plazo de la surgencia costera, debido a sus consecuencias para la producción biológica en las corrientes limítrofes orientales. Además, es oportuno notar que hay indicios de que en ambos hemisferios los vientos del oeste se han intensificado en las zonas de latitud media desde el decenio de 1960 (Gillett, Allan y Ansell, 2005). Se predice que este fenómeno se reforzará a causa del recalentamiento mundial, con cambios concomitantes en la circulación oceánica.

1.3.1 Circulación Meridional de Convección (CMC)

En virtud de la circulación meridional, los flujos de aguas superiores cálidas son transportados hacia las más distantes latitudes septentrionales. Este tránsito enfría las aguas, que se hunden y retornan hacia el sur en niveles más profundos. Los cambios en el ciclo hidrológico (incluida la dinámica de los hielos, puesto que el agua en congelación libera sal) pueden influir en la intensidad de la circulación meridional. El calor transportado por este flujo circulatorio contribuye considerablemente a la determinación del clima de Europa continental, pudiendo cualquier episodio de desaceleración tener consecuencias importantes en el clima atmosférico (un descenso de hasta 4 °C respecto a los valores presentes si se llegara a producir una detención completa de la corriente, Vellinga y Wood, 2002).

Las observaciones y predicciones derivadas de modelos indican que en el Ártico y en el sub-Ártico el aporte de agua dulce aumentará (en ambos casos debido a la menor disponibilidad de hielo marino resultante de la reducción de las precipitaciones, Schrank, 2007; Figura 5), con un consiguiente posible incremento de la estratificación



con estabilización de la capa de mezcla superficial, una reducción del flujo salino, una reducción de la convección oceánica y una menor formación de masas de aguas profundas (p. ej., Stenevik y Sundby, 2007), fenómenos que podrían conducir, en el Atlántico, a la reducción prolongada de la circulación termohalina y de la ventilación oceánica.

Una disminución de la circulación meridional de cerca del 30 por ciento ya fue observada entre 1957 y 2004 (Bryden, Longworth y Cunningham, 2005). Los modelos de simulación indican que la circulación meridional se hará más lenta durante el siglo XXI (hasta en un 25 por ciento en 2100 según el Informe especial A1B sobre escenarios de emisiones, Meehl *et al.*, 2007). Aunque esta respuesta podría retardarse en algunas décadas debido a una tendencia positiva en la Oscilación del Atlántico Norte, la oscilación no lograría evitarla (Delworth y Dixon, 2000).

En la actualidad, en ningún modelo climático se predice un cese completo de la circulación meridional, pero tal acontecimiento no puede ser descartado si el ritmo del recalentamiento sobrepasara un cierto umbral (Stocker y Schmittner, 1997). Schmittner (2005) advierte que un trastorno en la circulación termohalina reduciría las poblaciones zooplactónicas en más del 50 por ciento respecto a su biomasa original. Kuhlbrodt *et al.* (2005) realizaron un estudio en profundidad de las consecuencias físicas, biológicas y económicas para Europa septentrional de una alteración de la circulación termohalina, concluyendo que un cambio contundente podría determinar una subida del nivel del mar de más de 50 cm. Los autores indican además que habría fuertes repercusiones en toda la red trófica marina en el norte del Atlántico septentrional, que afectarían desde las algas hasta el plancton, camarones y peces.

En un estudio específico, Vikebo *et al.* (2005) investigaron las consecuencias de una reducción del 35 por ciento de la circulación termohalina en los mares noruegos. El estudio puso de manifiesto sobre todo un descenso de la temperatura de la superficie del mar (TSM) de hasta 3 °C en el mar de Barents debido a la menor afluencia de agua del Atlántico al mar de Barents y al aumento del flujo en el oeste de Svalbard. Conforme a la nueva hipótesis, las simulaciones de transporte de larvas y juveniles de bacalao indican un posible desplazamiento del área de distribución de las clases anuales hacia el sur y el oeste desde el mar de Barents hasta las estrechas plataformas de Noruega y Svalbard, y una reducción del crecimiento de los individuos juveniles pelágicos. Más adelante, estos movimientos darían origen a clases anuales más despobladas (probablemente en <10 por ciento respecto a las abundantes clases anuales actuales). Un mayor número de larvas y juveniles se desplazaría por advección hacia las zonas occidentales de Svalbard y eventualmente más lejos aún hacia el océano Ártico, donde (si prevalecieran las condiciones actuales) serían incapaces de sobrevivir.

1.3.2 Surgencia costera

Por la dinámica del bombeo de Ekman, que es gobernada por los vientos, son impulsados en las zonas orientales limítrofes los cuatro grandes sistemas mundiales de surgencia: la corriente de Humboldt, la de Benguela, la de California y la de Canarias; se añade a éstas, suplementándolas, una región en el mar Árabe frente al norte de África oriental que recibe el forzamiento de los vientos monzónicos.

Las evidencias respecto de las repercusiones del cambio climático en los fenómenos de surgencia son contradictorias y las predicciones difieren unas de otras. Bakun (1990) pronosticó que las diferencias de calentamiento entre océanos y masas continentales conducirían, por la intensificación del estrés de viento sobre la superficie del océano a lo largo de las costas, a una aceleración de la surgencia costera, e indicó que este efecto ya era evidente en las corrientes sobre el margen Ibérico y en las corrientes de California y de Humboldt. Esta hipótesis fue respaldada posteriormente por Snyder *et al.* (2003), quienes observaron una tendencia de 30 años del incremento de los fenómenos de surgencia producidos por el viento frente a California; esta hipótesis fue corroborada

por los resultados de los modelos de agentes de forzamiento climático regionales. Auad, Miller y Di Lorenzo (2006), apoyando las observaciones anteriores, llegaron a la conclusión de que, a lo largo de la costa californiana, el obstáculo representado por el aumento de la estratificación de las masas de agua recalentadas era superado por la surgencia causada por el estrés de viento.

También se han observado correlaciones positivas entre surgencia y temperatura atmosférica en los paleo-registros de la corriente de California (Pisias, Mix y Heusser, 2001). Los registros relativos a las aguas superficiales marinas obtenidos mediante análisis de muestras de sedimentos recogidos frente a la costa de Marruecos indican que un enfriamiento anómalo y sin precedentes ha tenido lugar durante el siglo XX; y que este fenómeno sería congruente con un aumento de la surgencia causado por los cambios climáticos (McGregor *et al.*, 2007).

También se ha constatado un incremento en la surgencia en el mar Arábigo durante el siglo XX, que se ha atribuido a un incremento térmico de la masa continental eurasiática debido al recalentamiento mundial (Goes *et al.*, 2005). Se llegó a esta conclusión relacionando los paleo-registros con la disminución de la cubierta de nieves invernales y vernaes en Eurasia y la intensificación del monzón sudoccidental (de verano), y por lo tanto con la potenciación de la surgencia costera (Anderson, Overpeck y Gupta, 2002). Esto indica que, a consecuencia de las concentraciones de gases de efecto invernadero podría tener lugar, durante el siglo próximo, una intensificación de los monzones sudoccidentales y de los fenómenos de surgencia.

En contraste con las observaciones anteriores, Vecchi *et al.* (2006) hacen notar que dado que el calentamiento será más intenso en los polos que en los trópicos, el frente de los alisios, que también favorece los vientos que estimulan los fenómenos de surgencia, debería debilitarse. Las simulaciones realizadas por Hsieh y Boer (1992) indican que no todos los continentes de media latitud responden a la hipótesis de Bakun (1990), según la cual en éstos se producirían bajas presiones anómalas en verano y vientos costeros más fuertes que favorecen la surgencia. En el océano abierto, las bandas de surgencia zonal ecuatorial y subpolares y las bandas de aguas descendientes se debilitarían conforme la intensidad de los vientos se aplaca, porque en condiciones de recalentamiento mundial el gradiente térmico ecuador-polo disminuye en la baja troposfera. Cuando la surgencia en el océano abierto es más débil y la surgencia costera no registra aumentos, el efecto general del recalentamiento sería una menor productividad biológica en todo el mundo. De hecho, las investigaciones más recientes coinciden en que el recalentamiento mundial reforzaría la estratificación térmica y causaría una profundización de la termoclina, y que ambas producirían una reducción de la surgencia y del suministro de nutrientes en las regiones oceánicas soleadas, disminuyendo la productividad (Cox *et al.*, 2000; Loukos *et al.*, 2003; Lehodey, Chai y Hampton, 2003; Roemmich y McGowan, 1995; Bopp *et al.*, 2005).

Fundándose en los modelos de circulación global (MCG), Sarmiento *et al.* (2004) concluyen que no existe, a escala mundial, una pauta clara acerca de la respuesta de la surgencia al recalentamiento, excepto en la zona comprendida entre los dos grados desde el ecuador, donde todos los modelos de circulación general atmósfera-océano, salvo uno, muestran una reducción (Sarmiento *et al.* 2004). En términos generales, los fenómenos de surgencia ecuatorial y costera que tienen lugar hasta los 15° desde el ecuador registran un descenso del 6 por ciento. Sin embargo, cabe advertir que los modelos climáticos actuales no permiten aún resolver los problemas relacionados con la surgencia costera (Mote y Mantua, 2002); y conviene por lo tanto considerar con precaución los resultados de las simulaciones de los MCG en gran escala. Las consecuencias de un incremento o decremento de la surgencia costera provocada por el cambio climático pueden ser drásticas y no limitarse a la producción biológica. Bakun y Weeks (2004) han planteado que si la surgencia se intensificara durante las próximas décadas, ello podría determinar alteraciones no deseadas, dominadas por

un crecimiento incontrolado del fitoplancton resultante de la rápida exportación del zooplancton herbívoro, la deposición de biomasa en el fondo marino y la erupción de gases de efectos invernadero nocivos.

En general, la respuesta de la surgencia costera al recalentamiento del clima adoptará seguramente aspectos más complejos y no se limitará a simples incrementos o decrementos. Concentrándose en la corriente de California, Diffenbaugh, Snyder y Sloan (2004) mostraron que la retroalimentación entre la superficie terrestre y la atmósfera, inducida por un forzamiento radiactivo de CO₂, acentuaba los contrastes térmicos entre las tierras y el mar, y que éstos se traducían en cambios en la surgencia estacional total y en fluctuaciones estacionales de los fenómenos de surgencia. Concretamente, la retroalimentación entre la superficie terrestre y la atmósfera original, cerca de la costa en la extremidad septentrional de la corriente de California, un aumento de la surgencia pico y de la surgencia de finales de estación, y un decremento más acentuado de ambas en las cercanías costeras de la extremidad meridional.

Barth *et al.* (2007) han puesto de manifiesto cómo, delante de las costas de California septentrional, un retraso de un mes en la aparición de los vientos de estrés favorables durante la fase de transición a la surgencia en la primavera de 2005 se tradujo en numerosas anomalías: la temperatura de las aguas cercanas a la costa fue en promedio 2 °C más alta que lo normal; la clorofila *a* y los nutrientes en la zona de rompimiento de las olas disminuyeron en un 50 y un 30 por ciento, respectivamente, en relación con el nivel normal; y la densidad de reclutamiento de mejillones y percebes fue, respectivamente, un 83 y un 66 por ciento menor. El retraso se asoció con el ciclo de vientos oscilatorio de 20 a 40 días y con una concomitante desviación hacia el sur de las corrientes en chorro; ello dio origen a la más pequeña acumulación de tensiones eólicas favorables a la surgencia registrada en 20 años. Los autores concluyeron que el retraso de la surgencia a principios de estación y el reforzamiento de la surgencia a finales de estación son fenómenos coherentes con predicciones que indican que el recalentamiento mundial influye en las regiones donde ocurren las surgencias costeras. Dada la importancia fundamental de estos fenómenos en los sistemas marinos costeros, es preciso dar alta prioridad a las investigaciones sobre las relaciones entre el clima y la surgencia.

1.4 Aumento del nivel del mar

El nivel promedio mundial del mar ha aumentado a un ritmo medio de 1,8 mm al año desde 1961 (Douglas, 2001; Miller y Douglas, 2004; Church *et al.*, 2004) amenazando muchas regiones de baja altitud. Desde 1993, el ritmo de alzamiento se acelerado alcanzando alrededor de 3,1 mm por año causado por la disminución de los glaciares de montaña y de la cubierta de nieve en ambos hemisferios y de los casquetes glaciares en Groenlandia y la Antártica (Bindoff *et al.*, 2007; Figura 5). En Groenlandia, el efecto de pérdida de hielo por derretimiento se ha agravado y ha excedido el índice de acumulación por caída de nieve. Sin embargo, la extensión de las superficies el hielo marino en la Antártica no muestra tendencias promedio estadísticamente significativas y es coherente con la ausencia de calentamiento que reflejan las temperaturas atmosféricas (Lemke *et al.*, 2007; Figura 5).

Hay indicios de una mayor variabilidad en el nivel del mar durante las últimas décadas, y esta señal puede concordar con una tendencia al aumento de la frecuencia, persistencia e intensidad de los fenómenos de El Niño (Folland *et al.*, 2001). Los modelos mundiales de proyección de la subida del nivel promedio del mar a finales del siglo XXI (2090-2099) en relación con el período 1980 a 1999 arrojan valores que oscilan entre 0,18 m (valor mínimo con arreglo al escenario B1, que describe un mundo convergente con los principios globales de sostenibilidad) y 0,59 m (valor máximo con arreglo al escenario A1FI, en el que se produce un muy rápido crecimiento económico mundial con un alto coeficiente de consumo de combustibles fósiles, Meehl *et al.*,

2007), aunque según algunos cálculos empíricos se llega a proyecciones de hasta 1,4 m (Rahmstorf, 2007).

Los modelos del IPCC usados hasta ahora no incluyen los factores de incertidumbre en el ciclo de retro-alimentación clima-carbono ni la totalidad de los efectos resultantes del cambio en los flujos provenientes de los casquetes debido a que en la literatura faltan estudios de base. En particular, se prevé que en Groenlandia el casquete polar seguirá contrayéndose y que esto contribuirá a la subida del nivel del mar después de 2100.

Las estimaciones revisadas del contenido térmico de las masas de agua superiores del océano (Domingues *et al.*, 2008) suponen que la gran expansión térmica del océano contribuirá a ocasionar un ascenso del nivel del mar que oscilará entre 0,5 y 0,8 mm por año a profundidades por debajo de los 700 m. Desde que el IPCC comenzó a hacer proyecciones en 1990, el nivel del mar ha aumentado de hecho, con valores en las cercanías del límite superior mencionado en el tercer informe de evaluación (y que equivale al límite superior del cuarto informe), el cual incluye un margen adicional estimado de 20 cm que refleja los aportes potenciales de las aguas provenientes de los casquetes polares. Es importante hacer notar que los cambios en el nivel del mar no son geográficamente uniformes porque dependen de los procesos regionales de circulación oceánica.

Todos los ecosistemas costeros son vulnerables a la subida del nivel del mar y a efectos antropogénicos más directos, en especial los arrecifes de coral y los humedales (incluidas las marismas y manglares). Estudios ecológicos de largo plazo sobre las comunidades costeras rocosas revelan ajustes que coinciden aparentemente con las tendencias climáticas (Hawkins, Southward y Genner, 2003). Según las proyecciones, en todo el mundo se registrarán pérdidas en humedales costeros del 33 por ciento si la subida del nivel del mar alcanzara 36 cm entre 2000 y 2080. Las mayores pérdidas se observarán probablemente en las costas del Atlántico y del Golfo de México de las Américas, el Mediterráneo, el Báltico y las pequeñas regiones insulares (Nicholls *et al.*, 2007).

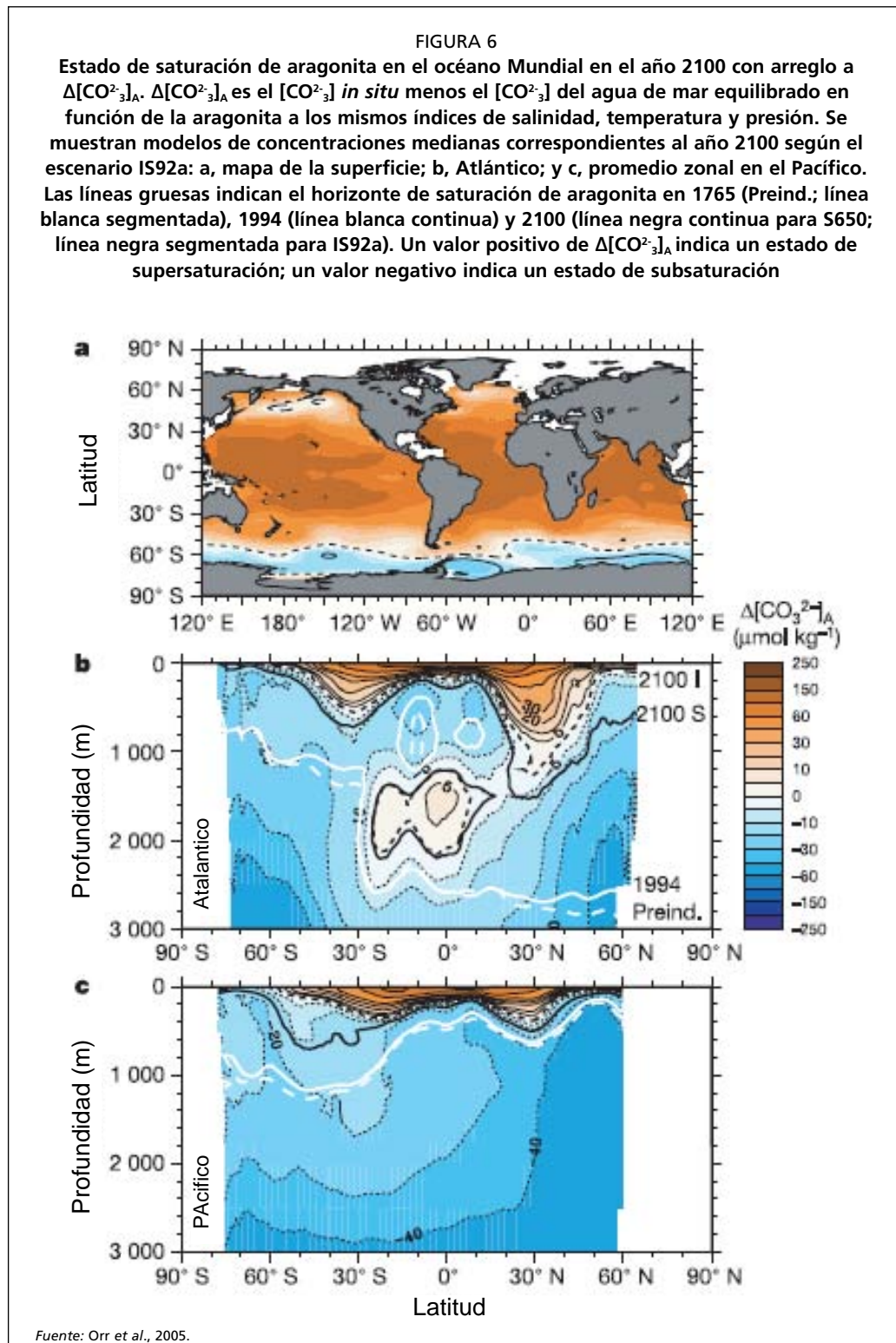
Durante los próximos 100 años, debido a la subida del nivel del mar en América del Norte pueden reducirse entre el 20 al 70 por ciento los hábitats inter-mareales de bahías ecológicamente importantes en aquellos lugares donde la topografía empinada y las estructuras construidas por el hombre (p. ej., muelles, malecones) impiden la migración hacia el interior de marismas y playas arenosas (Galbraith *et al.*, 2002).

Los principales factores de vulnerabilidad humana frente al cambio climático y la subida del nivel del mar se manifiestan cuando las condiciones de estrés que suelen imperar en las zonas costeras bajas coinciden con una situación de poca capacidad de adaptación del hombre y/o con condiciones de gran exposición. A este perfil de exposición corresponden, por ejemplo, los deltas, especialmente los megadeltas asiáticos (tales como el Ganges-Brahmaputra en Bangladesh y Bengala occidental), las zonas costeras urbanas bajas, especialmente las que son propensas a hundimientos naturales u ocasionados por el hombre y a desprendimientos de tierra causados por tempestades tropicales (p. ej., Nueva Orleans, Shanghái), y las pequeñas islas, sobre todo los atolones bajos (p. ej., las Maldivas) (Nicholls *et al.*, 2007).

1.5 Acidificación y otras propiedades químicas

Aproximadamente el 50 por ciento del CO₂ que entre 1800 y 1994 ha sido liberado por efecto de las actividades humanas ha quedado almacenado en los océanos (Sabine *et al.*, 2004), y cerca del 30 por ciento de las emisiones modernas de CO₂ son absorbidas por océanos en la actualidad (Feely *et al.*, 2004). La absorción continua de CO₂ ha reducido el pH del agua marina superficial en 0,1 unidades en los últimos 200 años. Dependiendo de la hipótesis de emisiones de CO₂ adoptada, los modelos indican que durante los próximos 100 años el pH seguirá reduciéndose en la capa superficial en 0,3 a 0,5 unidades (Caldeira y Wickett, 2005). Las repercusiones de estos cambios serán más pronunciadas en algunas regiones y para algunos ecosistemas, y especialmente

agudas para los organismos conchíferos, los arrecifes de coral tropicales y los corales de aguas frías en el océano Meridional (Orr *et al.*, 2005, Figura 6). Los modelos recientes elaborados por Feely *et al.* (2008) indican que para finales de siglo en algunas regiones del Pacífico septentrional sub-Ártico, la totalidad de la columna de agua estará subsaturada con respecto a la aragonita. Las aguas tropicales y subtropicales más cálidas registrarán probablemente una supersaturación que superará la gama de concentraciones proyectada de CO₂ atmosférico del IPCC (Feely *et al.* 2008).



En comparación con los cambios físicos, las repercusiones que sufrirán otros organismos marinos y ecosistemas son mucho menos ciertas, porque los mecanismos que determinan su susceptibilidad a una exposición moderada y prolongada al CO₂ no son suficientemente conocidos. Se espera que debido a la reducción del pH la profundidad de la zona por debajo de la cual se disuelve el carbonato de calcio varíe, y que en consecuencia aumente el volumen de las aguas oceánicas subsaturadas con respecto a la aragonita y la calcita, sustancias que intervienen en la formación de la concha de los organismos marinos (Kleypas *et al.*, 1999; Feely *et al.*, 2004). Los cambios en el pH pueden no solo repercutir en la calcificación sino también afectar de otras formas a las especies marinas. Havenhand *et al.* (2008) informan que el proceso de acidificación oceánica, que se pronostica para un futuro cercano, reducirá la motilidad espermática y comprometerá la fertilización del erizo de mar *Heliocidaris erythrogamma*; los autores indican que otras especies marinas de desove masivo pueden padecer riesgos análogos. Los calamares oceánicos se encuentran en situación de particular riesgo por la reducción del pH debido a las repercusiones de la acidificación en los procesos de transporte de oxígeno y en el funcionamiento del aparato respiratorio (Portner, Langenbuch y Michaelidis, 2005). Sin embargo, el grado de adaptabilidad de las especies y el ritmo de cambio del pH del agua de mar respecto a su índice de variabilidad natural son factores que no se conocen. Se espera que la subsaturación de aragonita afecte a corales y pterópodos (Hughes *et al.*, 2003; Orr *et al.*, 2005) y asimismo a otros organismos tales como los cocolitóforos (Riebesell *et al.*, 2000; Zondervan *et al.*, 2001). En contraste con las pruebas experimentales, en las cuales no hay posibilidades de adaptación, Pelejero *et al.* (2005) observaron que los corales masivos Porites de ~300 años de edad del Pacífico sudoccidental habían conseguido adaptarse a las grandes variaciones cíclicas de ~50 años del pH, y que covariaban con la oscilación decádica del Pacífico. Esto sugeriría que en los ecosistemas de arrecifes de coral la adaptación a los cambios de largo plazo del pH podría ser posible. Las investigaciones sobre las repercusiones de las grandes concentraciones de CO₂ en los océanos aún están en su infancia y deben ser desarrolladas rápidamente.

Otras propiedades químicas sujetas a sufrir cambios por las tendencias climáticas alteradas se refieren al oxígeno y a los nutrientes inorgánicos. La concentración de oxígeno de la termoclina ventilada (alrededor de 100-1 000 m) ha registrado disminuciones progresivas en la mayor parte de las cuencas oceánicas desde 1970 (Emerson *et al.*, 2004) en una gama comprendida entre 0,1 y 6 $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{año}^{-1}$, valores que se superponen a variaciones decádicas de $\pm 2 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{año}^{-1}$ (Ono *et al.*, 2001; Andreev y Watanabe, 2002). La disminución de O₂ observada se debería fundamentalmente a un reducido ritmo de renovación de las aguas intermedias (Bindoff *et al.*, 2007), y en menor grado a las variaciones en la demanda de O₂ de la materia orgánica que se deposita en las partes bajas del océano.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el recalentamiento mundial reforzará probablemente la estratificación térmica causando la profundización de la termoclina y, consiguientemente, el suministro de nutrientes en las aguas superficiales disminuirá. Muy pocos estudios han informado de cambios en las concentraciones de nutrientes inorgánicos. En el Pacífico septentrional la concentración de nitrato más nitrito (N) y fosfato se ha reducido en la superficie (Freeland *et al.*, 1997; Watanabe *et al.*, 2005), pero durante las dos décadas pasadas ha aumentado debajo de la superficie (Emerson *et al.*, 2004). No existen pautas claras de las variaciones de nutrientes en el océano profundo (Bindoff *et al.*, 2007).

1.6 Intercambios atmósfera-océano y tierras-océano

En el período 2000-2005, la absorción de CO₂ por los océanos equivalió a $2,2 \pm 0,2$ [GtCy⁻¹]² (de una cantidad de emisiones de CO₂ fósil de 7,2 GtCy⁻¹). Estos valores a lo menos duplican los de la absorción biosférica terrestre (Denman *et al.*, 2007). Se

ha postulado que si el nivel de CO₂ de la atmósfera aumentase, la capa de ozono se empobrecería (Austin, Butchart y Shine, 1992) y que ello conduciría potencialmente a una intensificación de la radiación ultravioleta sobre la superficie terrestre, con posibles efectos indirectos en los fenómenos oceánicos (véase la Sección 2.7).

El cambio de uso de la tierra –y en particular la deforestación y las modificaciones hidrológicas– ha conllevado repercusiones aguas abajo, sobre todo erosionando las zonas de captación. La carga sólida en suspensión en el Huang He (río Amarillo), por ejemplo, ha aumentado entre dos y diez veces a lo largo de los últimos 2 000 años (Jiongxin, 2003). Por el contrario, las represas y la canalización han producido una fuerte reducción del suministro de sedimentos de otros ríos a las costas, ya que los sedimentos son retenidos por las presas (Syvitski *et al.*, 2005). Los cambios en los flujos de agua dulce afectarán a los humedales costeros alterando la salinidad, los aportes sedimentarios y la carga de nutrientes (Schallenberg, Friedrich y Burns, 2001; Floder y Burns, 2004). Un régimen de afluencia de agua dulce con distintas propiedades hacia el océano conducirá a modificaciones en la turbidez, salinidad, estratificación y disponibilidad de nutrientes. Todos estos cambios afectarán a los ecosistemas estuarinos y costeros (Justic, Rabalais y Turner, 2005) pero de manera variable según la localidad. Por ejemplo, el incremento del caudal del Misisipi haría aumentar la frecuencia de los episodios de hipoxia en el Golfo de México, mientras que un incremento de la descarga fluvial en la bahía de Hudson tendría efectos opuestos (Justic, Rabalais y Turner, 2005). Halls y Welcomme (2004) realizaron estudios de simulación para elaborar criterios de gestión de regímenes hidrológicos relacionados con los peces y pesquerías en los grandes sistemas fluviales de llanos inundables. Los autores llegaron a la conclusión de que, en general, la producción de peces era máxima cuando el índice de descenso de aguas era mínimo y cuando la duración de las inundaciones y las superficies o volúmenes de tierras inundadas durante la estación seca eran máximos.

Poca atención se ha prestado a la compensación de ventajas y desventajas entre uso de la tierra y producción de captura continental, por ejemplo entre producción arroceras y producción pesquera continental durante la estación seca en los llanos inundables de Bangladesh. Shankar, Halls y Barr (2004) observaron que los llanos inundables y los recursos hídricos en Bangladesh están siendo sometidos a una presión creciente durante los meses de invierno, que es la época crítica que determina la supervivencia y propagación de los peces residentes. En los sistemas de llanos fluviales inundables, en particular en el mundo en desarrollo, es necesario tomar en consideración los compromisos entre producción pesquera y producción arroceras en el contexto del cambio climático y sus efectos en los sistemas hidrológicos (Shankar, Halls y Barr, 2004).

Los manglares son arbustos adaptados a las zonas costeras anegadas y con suelos a menudo anóxicos, pero su tolerancia al estrés por salinidad varía según las especies. El influjo de agua dulce no solo reduce la salinidad de las aguas costeras sino que también aumenta la estratificación de la columna de agua, y así limita el reabastecimiento de nutrientes desde abajo. Las inundaciones se asocian con un aumento de la productividad porque los nutrientes son arrastrados hacia el mar (McKinnon *et al.*, 2008). Aunque las diatomeas parecen ser afectadas por el aumento de las descargas fluviales, se ha observado que los dinoflagelados se ven favorecidos por el aumento de la estratificación y la disponibilidad de sustancias húmicas producidas por el aporte de agua dulce (Carlsson *et al.*, 1995; Edwards *et al.*, 2006). Sin tener en cuenta cuál pueda ser la dirección del cambio, las modificaciones de la escorrentía pluvial y las variaciones acompañantes de salinidad y suministro de recursos deberían por consiguiente afectar la composición y eventualmente también la productividad de las comunidades fitoplanctónicas en aguas costeras.

² [GtCy⁻¹] Gigatoneladas de Carbono por año (1 GtCy⁻¹ = 1.000.000.000 toneladas).

1.7 Patrones de variabilidad climática de baja frecuencia

Los patrones de circulación atmosférica resultan principalmente de los contrastes térmicos entre los polos y el ecuador –que son modulados por los efectos de la variación estacional–, y de los diferentes ritmos de absorción y liberación de calor de las tierras y el agua. Se obtiene así un mosaico de regiones más cálidas y más frescas caracterizadas por diversos patrones de circulación atmosférica de diferente persistencia. Hasta qué punto los patrones preferidos de variabilidad pueden ser considerados los verdaderos modos de comportamiento del sistema climático es discutible, no obstante estos patrones sirven para explicar la variabilidad física y biológica del océano, en particular a escala decádica (véase p. ej., Lehodey *et al.*, 2006). Puesto que algunos patrones climáticos naturales se caracterizan por períodos muy largos, es difícil discernir si la variabilidad oceánica decádica es natural o si corresponde a una señal de cambio climático; estos factores deben por lo tanto ser tratados de forma separada de los patrones de calentamiento gradual, lineal y a largo plazo que se esperan de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, puede haber repercusiones debidas a la gradualidad de los efectos del cambio climático en la intensidad, duración y frecuencia de estos patrones climáticos y en sus teleconexiones.

Overland *et al.* (2008) concluyeron que en su mayor parte la variabilidad climática en los océanos Atlántico y Pacífico se explica por una combinación de acontecimientos intermitentes de uno o dos años de duración (p. ej., el fenómeno de oscilación meridional El Niño) y un «ruido rojo» de banda ancha (las señales grandes solo son visibles cuando un cierto número de fenómenos adicionales, por lo demás aleatorios, se suman unos a otros en igualdad de fase) más factores de variabilidad intrínseca que ocurren a escala decádica o a una escala aún mayor. La predictibilidad del fenómeno de El Niño ha sido posible hasta cierto punto. Aunque el almacenamiento térmico y el desfase de los océanos ofrecen una memoria climática de varios años, no se ha conseguido entender todavía los mecanismos fundamentales que gobiernan la gran variabilidad decádica. En los acontecimientos decádicos se registrarán cambios bruscos y fuertes desviaciones respecto a la media climática, pero no es posible aún predecir cuándo ocurrirán (Overland *et al.*, 2008).

En esta sección se describen los principales patrones de variabilidad climática que tienen que ver con la producción pesquera y sus repercusiones observadas en los procesos biológicos. Las repercusiones ecosistémicas, que a menudo equivalen a cambios de régimen, se discuten más detalladamente en la Sección 2.9 (Cambios de régimen).

El factor determinante más evidente de la variabilidad interanual es el fenómeno de oscilación meridional El Niño. Los climatólogos han definido arbitrariamente qué es y qué no es un fenómeno El Niño (Trenberth, 1997), y en la actualidad, sus fases cálidas son llamadas «El Niño» y sus fases frías «La Niña». Se trata de un fenómeno irregular de oscilación meridional de tres a siete años de duración que implica una condición climática cálida y una fría que evolucionan por la interacción dinámica entre la atmósfera y el océano. Aunque los efectos de la oscilación meridional se advierten en todo el mundo (Glynn 1988; Bakun 1996), el fenómeno es más patente en el Pacífico ecuatorial, con una intensidad sumamente variable entre un episodio y otro. Los acontecimientos de El Niño se asocian con un gran número de patrones atmosféricos y oceánicos que incluyen anomalías en la pluviosidad en las regiones tropicales, en Australia, en África austral y la India y en partes de las Américas, vientos de levante a través de todo el Pacífico tropical, patrones de la presión atmosférica por todos los trópicos y las temperaturas de la superficie del mar (Nicholls 1991; Reaser, Pomerance y Thomas, 2000; Kirov y Georgieva, 2002). Acompañan estas anomalías cambios ecológicos enormes y de alcance mundial que se traducen en influencias en el plancton (MacLean 1989), en los macrófitos (Murray y Horn 1989), en los crustáceos (Childers, Day y Muller, 1990), en los peces (Mysak, 1986; Sharp y McLain, 1993), en los mamíferos marinos (Testa *et al.*, 1991; Vergani, Stanganelli y Bilenca, 2004), las aves

marinas (Anderson, 1989; Cruz y Cruz, 1990; Testa *et al.*, 1991) y los reptiles marinos (Molles y Dahm, 1990).

Tres son las principales repercusiones del fenómeno de El Niño en la surgencia costera: el incremento de la temperatura en zonas costeras; la disminución de la producción planctónica por profundización de la termoclina (que inhibe el afloramiento de los nutrientes), y modificaciones en las relaciones trofodinámicas (Lehodey *et al.*, 2006). En las zonas no sujetas a surgencia, El Niño induce modificaciones en la estructura vertical de la columna de agua, y de consecuencia los hábitats disponibles aumentan o disminuyen (Lehodey, 2004).

La fase de aguas templadas de la oscilación meridional se asocia con importantes alteraciones en la abundancia planctónica y con modificaciones afines de las redes tróficas (Hays, Richardson y Robinson, 2005), y asimismo con cambios en el comportamiento (Lusseau *et al.*, 2004), en la proporción de sexos (Vergani *et al.*, 2004) y en la alimentación y dieta (Piatkowski, Vergani y Stanganelli, 2002) de los mamíferos marinos. El fuerte fenómeno de El Niño de 1997 ocasionó el descoloramiento de los corales en todos los océanos (hasta en el 95 por ciento de los corales del océano Índico) y terminó destruyendo el 16 por ciento de los corales mundiales (Hoegh-Guldberg, 1999, 2005; Wilkinson, 2000).

Las pruebas recogidas acerca de variaciones genéticas relacionadas con los umbrales térmicos en algas simbioses obligadas parecen indicar que éstas podrían manifestar una respuesta evolutiva al aumento de la temperatura del agua (Baker, 2001; Rowan, 2004). Sin embargo, otros estudios señalan que muchos arrecifes ya han alcanzado su límite de tolerancia térmica (Hoegh-Guldberg, 1999).

Según algunos estudios, el recalentamiento mundial daría origen a fenómenos de El Niño más intensos y frecuentes (p. ej., Timmerman *et al.*, 1999; Hansen *et al.*, 2006); otros autores aseveran que los indicios aún no son concluyentes (Cane, 2005) porque la oscilación meridional no se ha conseguido simular adecuadamente en los modelos climáticos para que los cambios proyectados resulten plenamente fiables (Overland *et al.*, 2008). Los episodios de El Niño se relacionan con cambios climáticos que ocurren fuera del océano Pacífico mediante asociaciones atmosféricas remotas o teleconexiones (Mann y Lazier, 1996). Esto significa que las modificaciones en la posición e intensidad de los fenómenos de convección atmosférica en una zona producirán reajustes en las células de presión en zonas adyacentes, pudiendo conducir, a escala mundial, a alteraciones en los patrones de los vientos y corrientes oceánicas. Los cambios por teleconexión podrían producirse al relacionarse éstos con la nutación de la Tierra (cíclica variación de la inclinación del propio eje terrestre, Yndestad, 1999) o por alteraciones de la velocidad de rotación terrestre (Beamish, McFarlane y King, 2000).

Las teleconexiones más destacadas que se registran en el hemisferio norte son la oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el patrón Pacífico-Norte Americano (PNA por sus siglas en Inglés) (Barnston y Livezey, 1987). La amplitud de ambos patrones de oscilación es máxima durante los meses de invierno. La oscilación del Atlántico norte es un índice que refleja las diferencias de presión norte-sur entre las temperaturas y las altas latitudes en el sector Atlántico (Hurrell *et al.*, 2003). Por lo tanto, las oscilaciones del índice de valores positivos a negativos (o a la inversa) corresponden a grandes cambios en la velocidad media y dirección del viento sobre el Atlántico, al transporte de calor y humedad entre el Atlántico y los continentes vecinos, y a la intensidad y número de tempestades atlánticas, sus trayectorias y condiciones climatológicas. Parece que la existencia de la oscilación del Atlántico norte no se debe esencialmente a las interacciones conjugadas entre el océano, la atmósfera y las tierras, sino que es producto de procesos intra-atmosféricos en los cuales diferentes escalas de movimientos se interrelacionan y ocasionan variaciones aleatorias altamente impredecibles comprendidas en una escala cronológica fundamental de diez o más días (Overland *et al.*, 2008).

Los cambios en el índice de oscilación del Atlántico norte han coincidido con alteraciones sufridas por las comunidades biológicas, las cuales se evidencian en diversos niveles tróficos, por ejemplo en la estructura de las comunidades zooplanctónicas (Planque y Fromentin, 1996), en la cronología de los picos de abundancia de calamares (Sims *et al.*, 2001), en el reclutamiento y biomasa de los gádidos (Hislop, 1996; Beaugrand *et al.*, 2003) y en las poblaciones de arenques (*Clupea harengus*, Clupeidae) y sardinas (Southward *et al.*, 1988), y ocasionalmente en forma de cambios de régimen (véase la Sección 2.9).

Las observaciones y predicciones realizadas a partir modelos de circulación general (MCG) parecen indicar que durante las últimas décadas el índice de oscilación del Atlántico norte ha sido elevado (positivo) (Cohen y Barlow, 2005) y que, pese a sus fluctuaciones, lo seguirá siendo durante el siglo XXI a causa de los efectos del cambio del clima (Palmer, 1999; Gillet, Graf y Osborn, 2003; Taylor, 2005). Hay también indicios de que la tendencia ascendente del índice durante la segunda mitad del siglo XX se debió en parte al forzamiento de la temperatura marina superficial y/o al enfriamiento registrado en altas latitudes y a una mayor evaporación en las latitudes subtropicales. No sería poco razonable admitir que parte del cambio climático observado en el Atlántico norte –forzado por el lento calentamiento de la superficie de los mares tropicales– representa un signo de alteración antropogénica que ha emergido solo ahora (Overland *et al.*, 2008). Más aún, como tanto la oscilación del Atlántico norte como la oscilación meridional El Niño son factores clave determinantes del clima regional, resulta difícil diferenciar cuáles son los cambios naturales y cuáles los inducidos por el hombre.

La teleconexión del patrón Pacífico-Norte Americano se establece con cuatro centros de presión alta y baja que están en una ruta aproximadamente circular que del Pacífico central pasa a través del golfo de Alaska y el oeste de Canadá y llega al sudeste de los Estados Unidos de América. Encima del océano Pacífico Norte, en las cercanías de las Aleutianas, las presiones atmosféricas están fuera de fase con respecto a las presiones del sur, y forman un vaivén que pivota a lo largo de la posición mediana de la corriente en chorro del Pacífico subtropical, que corresponde al centro de los principales vientos atmosféricos del poniente (provenientes del oeste). Sobre América del Norte, las variaciones que se registran en Canadá y el sudoeste de los Estados Unidos de América presentan una correlación negativa con las del sudeste de este último país, pero tienen una correlación positiva con el centro del Pacífico subtropical. En la superficie, la huella del patrón Pacífico-Norte Americano se limita principalmente al Pacífico. Al igual que la oscilación del Atlántico Norte, el PNA es un modo de variabilidad atmosférica interno, y está estrechamente relacionado con un índice de variabilidad de la temperatura marina superficial del Pacífico septentrional llamado oscilación decádica del Pacífico. La oscilación del Atlántico Norte y el patrón Pacífico-Norteamericano explican cerca del 35 por ciento de la variabilidad climática que ha tenido lugar en el siglo XX (Quadrelli y Wallace, 2004).

Los cambios en las patrones de variabilidad climática del Pacífico septentrional se suelen denominar cambios de régimen (véase la Sección 2.9). El índice generalmente usado para señalar los cambios está basado en la oscilación decádica del Pacífico, que se define como la primera función ortogonal empírica de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico septentrional (Mantua *et al.*, 1997). El cambio de régimen de 1977 determinó modificaciones en el estrés de viento sobre la superficie del mar (Trenberth, 1991), ocasionó el enfriamiento del Pacífico central, el calentamiento a lo largo de la costa occidental de América del Norte y la reducción de la banquisa en el mar de Bering (Miller *et al.*, 1994; Manak y Misak, 1987). Hay indicios de otros cambios ocurridos en 1925, 1947 (Mantua *et al.*, 1997) y 1989 (Beamish *et al.*, 1999) y posiblemente también en 1998 (McFarlane, King y Beamish, 2000). En torno a la época del cambio de régimen de 1977, la clorofila *a* total casi se duplicó en el Pacífico

septentrional central debido a la profundización de la capa de mezcla (Venrick, 1994), mientras que en el Golfo de Alaska dicha capa fue menos profunda (pero también más productiva, Polovina, Mitchum y Evans, 1995). Estos cambios originaron una drástica disminución de la biomasa zooplanctónica delante de las costas de California causada por el aumento de la estratificación y la reducción del agua de surgencia, que es rica en nutrientes (Roemmich y McGowan, 1995). Sin embargo, las respuestas del zooplancton no fueron en absoluto lineales y se atribuyeron mayormente a la presencia de sálpidos y doliólidos (Rebstock, 2001).

Hay pruebas de que estos patrones climáticos pueden determinar respuestas regionales al forzamiento de amplitud mayor de lo que se podría esperar en otras circunstancias. Por lo tanto es importante probar la capacidad de los modelos climáticos de simular tales respuestas, y ponderar hasta qué punto los cambios observados que se relacionan con estas patrones se refieren a factores de variabilidad climática internos o a cambios climáticos de naturaleza antropogénica. En general, la respuesta primaria de los modelos del IPCC a los patrones climáticos evidencia una tendencia espacial de calentamiento bastante homogénea por todas las cuencas oceánicas, combinada con una variabilidad decádica continua similar a la observada durante el siglo XX, a la oscilación del Atlántico norte, a la pauta pacífico-norteamericana, etc. (Overland y Wang, 2007).

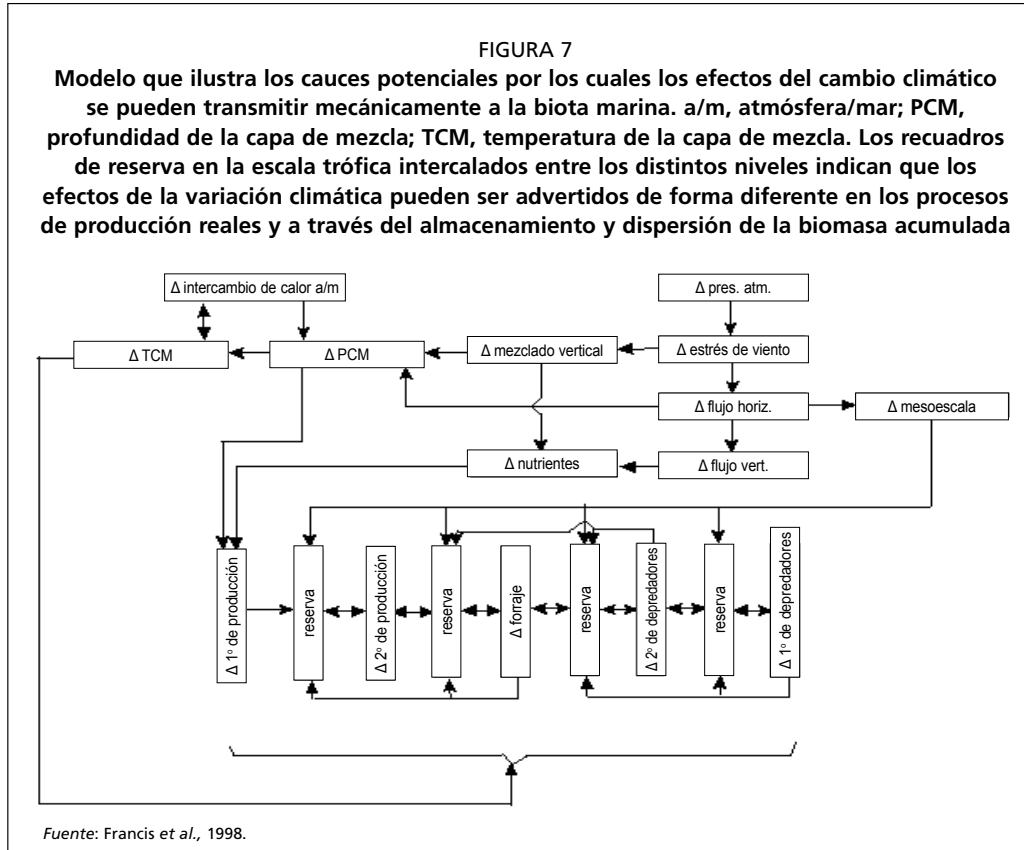
Las variables climáticas tales como la temperatura y el viento pueden tener teleconexiones fuertes (amplia covariabilidad espacial) dentro de las cuencas oceánicas individualmente consideradas; pero las teleconexiones entre cuencas y la potencial sincronización de los procesos biológicos debido al clima a lo largo de varias décadas son con frecuencia más débiles (Overland *et al.*, 2008).

2. EFECTOS OBSERVADOS DE LA VARIABILIDAD Y EL CAMBIO CLIMÁTICOS EN LOS PROCESOS DEL ECOSISTEMA Y DE PRODUCCIÓN PESQUERA

El cambio climático repercute directamente en el funcionamiento de los organismos. Los trastornos se advierten en las diversas etapas del ciclo biológico y se manifiestan en la fisiología, morfología y comportamiento de los individuos. Las repercusiones climáticas también afectan a las poblaciones, que evidencian perturbaciones en los procesos de transporte que influyen en los patrones de dispersión y reclutamiento. Los efectos a nivel de las comunidades se revelan a través de especies interactuantes (tales como los depredadores, los competidores, etc.), e incluyen cambios tanto en la abundancia como en la intensidad de las interacciones entre estas especies. La combinación de las repercusiones inmediatas da origen en las especies a respuestas ecológicas emergentes, por ejemplo a alteraciones en la distribución, la biodiversidad y los procesos micro evolutivos (Harley *et al.*, 2006).

En general, la información observacional sobre las repercusiones del cambio climático en los ecosistemas marinos es escasa. Por ejemplo, solo el 0,1 por ciento de las series cronológicas examinadas en los informes del IPCC se refieren al medio marino (Richardson y Poloczanska, 2008). Por lo tanto, es difícil generalizar, máxime cuando las repercusiones se manifestarán probablemente de forma diferente en las distintas partes de los océanos del mundo. Por ejemplo, los patrones de variabilidad observados en la superficie son más evidentes en los océanos Pacífico e Índico que en el Atlántico (Enfield y Mestas-Núñez, 2000), sobre todo porque el océano Pacífico occidental y el océano Índico oriental son los que encierran la mayor superficie de agua templada del mundo. Los efectos ejercidos por esta reserva de agua templada en las escalas temporales interanuales o pluridecadales pueden traducirse en grandes variaciones en la producción primaria, la abundancia de peces y la estructura del ecosistema a nivel de las cuencas de captación (Chávez *et al.*, 2003).

Pese a la insuficiencia de datos, existen en la actualidad pruebas significativas de cambios observados en los sistemas físicos y biológicos en respuesta al cambio climático en todos los continentes, comprendida la Antártica, y también en la mayor parte de los



océanos, si bien la mayoría de los estudios se refieren a zonas de latitudes medias o altas del hemisferio norte. La documentación acerca de los cambios observados en regiones tropicales y en el hemisferio sur es sumamente exigua (Parry *et al.*, 2007).

Los sistemas marinos de agua dulce responden a los efectos sinérgicos combinados de los cambios físicos y químicos ejerciendo influjos directos e indirectos en todos los procesos biológicos (véase la Figura 7). En las secciones siguientes se presenta un resumen de los procesos fisiológicos, de desove y de reclutamiento mediante los cuales las poblaciones marinas y de agua dulce responden a la variabilidad medioambiental y climática. Éstos son también procesos y respuestas obligados de los individuos y poblaciones para adecuarse al cambio climático. A continuación se dan ejemplos de indicadores sustitutivos de la forma en que las poblaciones, comunidades y ecosistemas marinos y de agua dulce reaccionan potencialmente ante la variabilidad climática observada.

2.1 Resumen de los procesos fisiológicos, de desove y de reclutamiento susceptibles a la variabilidad climática

2.1.1 Efectos fisiológicos del cambio climático en los peces

La mayor parte de los animales marinos y acuáticos son de sangre fría (poiquiloterms) y por lo tanto su ritmo metabólico es fuertemente afectado por las condiciones ambientales externas, en particular la temperatura. La tolerancia térmica de los peces, según la descripción de Fry (1971), consiste en respuestas de tipo letal, de control y direccional que indican que los peces responderán a la temperatura mucho antes de que ésta alcance límites letales. Magnuson, Crowder y Medvick, (1979) propusieron el concepto de nicho térmico por analogía con los nichos relacionados con otros recursos tales como los alimentos o el espacio.

Los autores determinaron que los peces de agua dulce norteamericanos pasan toda su vida en un ambiente comprendido entre ± 5 °C respecto de su temperatura preferida, y que era posible reunirlos en tres agrupaciones térmicas: las especies adaptadas al agua

fría, al agua fresca y al agua templada. Un incremento de temperatura moderado puede determinar un aumento de las tasas de crecimiento y de conversión alimenticia hasta el límite de tolerancia de cada especie.

Las variaciones térmicas también afectan fuertemente a las especies marinas. Éstas exhiben un ámbito de tolerancia térmica muchas veces comparable con el de los peces de agua dulce (p. ej., Rose, 2005 enumera los límites de distribución térmica para 145 especies de peces en el Atlántico septentrional sub-Ártico). La tolerancia térmica de los organismos marinos es de índole no lineal, con condiciones óptimas que se dan a mitad de escala y condiciones de crecimiento empeoradas a temperaturas que son demasiado altas o demasiado bajas. Pörtner *et al.* (2001) encontraron que tanto para el bacalao del Atlántico (*Gadus morhua*) como para la viruela común (*Zoarces viviparus*) las tasas de crecimiento y fecundidad específicas de la temperatura disminuían en las altas latitudes. Takasuka, Oozeki y Aoki, (2007) sugirieron que las diferencias en las temperaturas óptimas de crecimiento durante las etapas de desarrollo tempranas de la anchoa japonesa (*Engraulis japonicus*; 22 °C) y de la sardinela del Japón (*Sardinops melanostictus*; 16,2 °C) podían explicar, en el océano Pacífico septentrional oeste, los cambios entre un régimen templado, favorable para la anchoa, y un régimen frío, favorable para la sardina.

En muchos estudios macrofisiológicos se ha constatado que los organismos que han sido transferidos a un medio diferente de aquel en el que se habían adaptado a vivir no conseguían funcionar apropiadamente, en comparación con otros organismos relacionados que previamente se habían logrado adaptar a esas condiciones nuevas (Osovitz y Hofmann, 2007). Pörtner (2002) ha descrito la interacción entre preferencia térmica y suministro de oxígeno, que consiste en que la capacidad de entrega de oxígeno a las células es justo suficiente para satisfacer la demanda máxima de oxígeno del animal entre los índices alto y bajo de las temperaturas ambientales esperadas. Cuando los peces se ven expuestos a un medio más cálido que aquel al que se habían adaptado, sus mecanismos fisiológicos son incapaces de hacer frente a la mayor demanda de oxígeno de los tejidos durante períodos prolongados. Esto limita la tolerancia total del animal a la exposición a índices de temperatura extremos (Pörtner y Knust, 2007). Según Pörtner y Knust (2007), el factor que conduce a las alteraciones en la distribución o a la extinción de los peces que provienen de medios más fríos es la carencia de suministro de oxígeno a los tejidos, cuando el ambiente se calienta y la demanda metabólica aumenta. Los individuos de mayor tamaño pueden correr más riesgo frente a este efecto ya que llegan antes que los pequeños a su límite aeróbico térmico (Pörtner y Knust, 2007).

En muchos casos, tales cambios en las condiciones térmicas coinciden también con modificaciones de otras características, como cambios en el nivel del mar (y por lo tanto de regímenes de exposición, véase p. ej. Harley *et al.*, 2006) y en el nivel de los lagos (véase p. ej. Schindler, 2001); cambios en la composición y cantidad de alimentos; y cambios en la acidez y otras propiedades químicas. En un estudio sobre los efectos de los cambios de temperatura en la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en presencia de un bajo índice de pH y un alto índice de nitrógeno, Morgan, McDonald y Wood (2001) encontraron que el crecimiento mejoraba en invierno cuando la temperatura aumentaba 2 °C, pero que disminuía en verano, cuando al aumento de 2 °C se sumaban las ya elevadas temperaturas. Por consiguiente, las influencias estacionales y los casos en que se registran los mencionados cambios pueden ser tan o más importantes que los cambios que se expresan en períodos de un año.

El término «envoltura bioclimática» se ha acuñado para definir la interacción entre los efectos y los límites de temperatura, salinidad, oxígeno, etc. y su repercusión en el comportamiento y capacidad de supervivencia de las especies (véase p. ej. Pearson y Dawson, 2003). Estas envolturas podrían servir para elaborar modelos de alteraciones en la distribución y patrones de abundancia de las especies resultantes del cambio climático. Los numerosos experimentos realizados en vivero respecto a

una gran variedad de vertebrados e invertebrados marinos y de aguas dulces deberían permitir conocer más acerca de su respuesta a las condiciones medioambientales y las condiciones que determinan un crecimiento óptimo o deficiente.

2.1.2 *Desove*

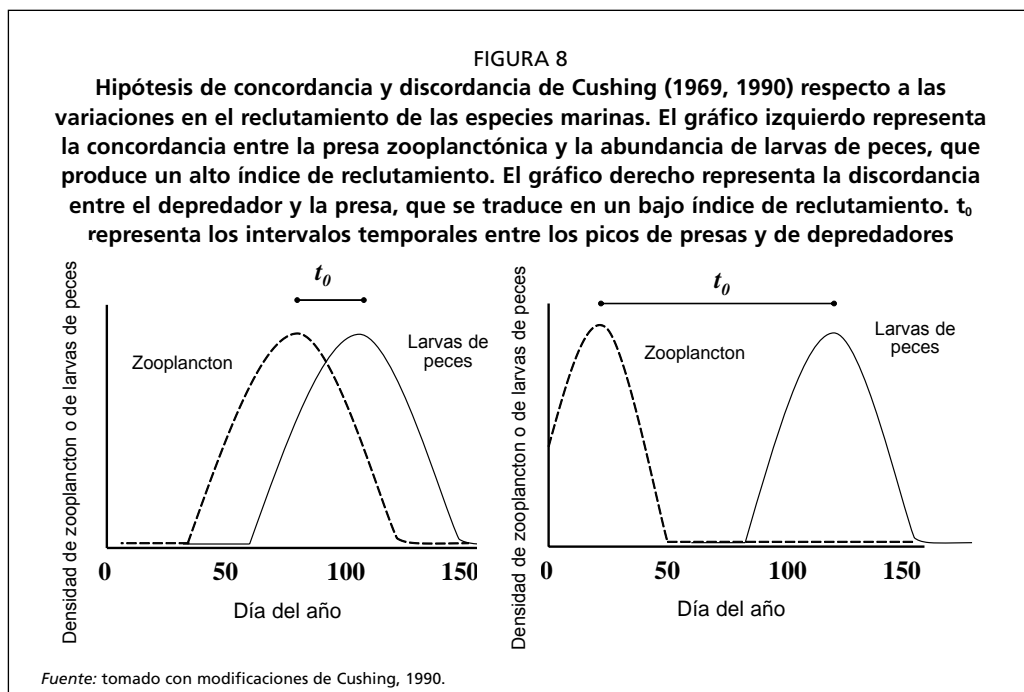
Las características del desove y el éxito reproductivo de los organismos marinos y de aguas dulces dependen en gran medida de los mecanismos que controlan los procesos evolutivos. Para estar en condiciones de completar su ciclo biológico y reproducirse, los organismos se adaptan a las condiciones actuales del medio y, en lo posible, a su variabilidad. En este contexto, la influencia de los factores de variabilidad y cambio climático en el desove y en la reproducción también están estrechamente relacionados con el influjo de tales factores en el crecimiento y reclutamiento y la incorporación de los individuos en la población madura. Los períodos y lugares de desove han evolucionado para ajustarse a las condiciones físicas (p. ej., temperatura, salinidad y corrientes) y biológicas (tales como los alimentos) dominantes que aumentan las posibilidades de la larva de sobrevivir y convertirse en un adulto capaz de reproducirse, o que permiten por lo menos minimizar los eventuales trastornos debidos a acontecimientos climáticos impredecibles. Mientras que la evolución es responsable del tipo de desove, los factores ambientales como la temperatura ejercen una influencia significativa en algunas características específicas del desove. Entre éstas están el período de desove (p. ej., del bacalao del Atlántico, Hutchings y Myers, 1994), el tamaño de los huevos y el consiguiente tamaño de las larvas en el momento de la eclosión (p. ej., del bacalao del Atlántico, Pepin, Orr y Anderson, 1997). Crozier *et al.* (2008) llegaron a la conclusión de que es probable que el cambio climático determine con precisión la fecha de desove del salmón del Pacífico en el sistema fluvial del río Columbia. Se ha demostrado asimismo que la temperatura influye en la edad de madurez sexual, por ejemplo del salmón del Atlántico (*Salmo salar*; Jonsson y Jonsson, 2004) y del bacalao del Atlántico (Brander, 1994). En el caso de estas especies de aguas frías, un medio más templado adelanta la edad de madurez, es decir los individuos maduran más jóvenes.

2.1.3 *Reclutamiento de peces y cambio climático*

La variabilidad del reclutamiento y sus causas y consecuencias para las poblaciones ícticas comerciales en particular han sido el problema más importante de la ciencia pesquera en los últimos 100 años. Se han logrado grandes avances, pero es raro que los pronósticos de reclutamiento cuantitativo se usen para asesorar en materia de ordenación pesquera. Tales predicciones, que se fundan a menudo en variables medioambientales, tienden a usarse en el caso de las especies poco longevas (p. ej., la sardina californiana, Jacobson *et al.*, 2005; el calamar, Rodhouse, 2001) porque la abundancia de las especies longevas se puede evaluar mejor mediante estudios dirigidos de las clases de edad tardías.

Muchas teorías y procesos tratan de explicar las causas de la considerable reducción numérica que ocurre en la mayor parte de las especies marinas y acuáticas a medida que éstas se desarrollan pasando del huevo a la larva, a juveniles y finalmente a adultos (véase p. ej. un resumen de este proceso en el reciente estudio de Ottersen *et al.*, 2008). Las hipótesis se pueden agrupar en tres categorías generales: inanición y depredación, dispersión física y procesos de síntesis.

Una de las principales hipótesis propone relacionar los efectos de la inanición con el reclutamiento –con claras conexiones con la variabilidad y el cambio del clima. Esta es la hipótesis de concordancia y discordancia de Cushing (1969; 1990) (véase también Durant *et al.*, 2007). Se reconoce que los peces, especialmente en sus etapas tempranas, necesitan alimento para sobrevivir y crecer; y también que los períodos de gran producción trófica en el océano pueden estar sujetos a variaciones que dependen a menudo del clima (intensidad de los vientos, frecuencia de las tormentas, aporte de calor o de agua dulce a las capas superficiales). Se propone por consiguiente que la



concordancia o discordancia cronológica entre las épocas en que hay disponibilidad de alimentos y los momentos y lugares en que los peces (en particular durante las etapas tempranas) son capaces de encontrar y consumir estos alimentos (Figura 8) es el principio que determina el reclutamiento y la ulterior abundancia de las especies marinas y de agua dulce. Winder y Schindler (2004a) han demostrado cómo las primaveras más cálidas en un lago de aguas templadas han adelantado la estratificación térmica y la floración de las diatomeas, y que de este modo los enlaces tróficos han sufrido perturbaciones y las poblaciones de un depredador clave (*Daphnia* spp.) se han reducido.

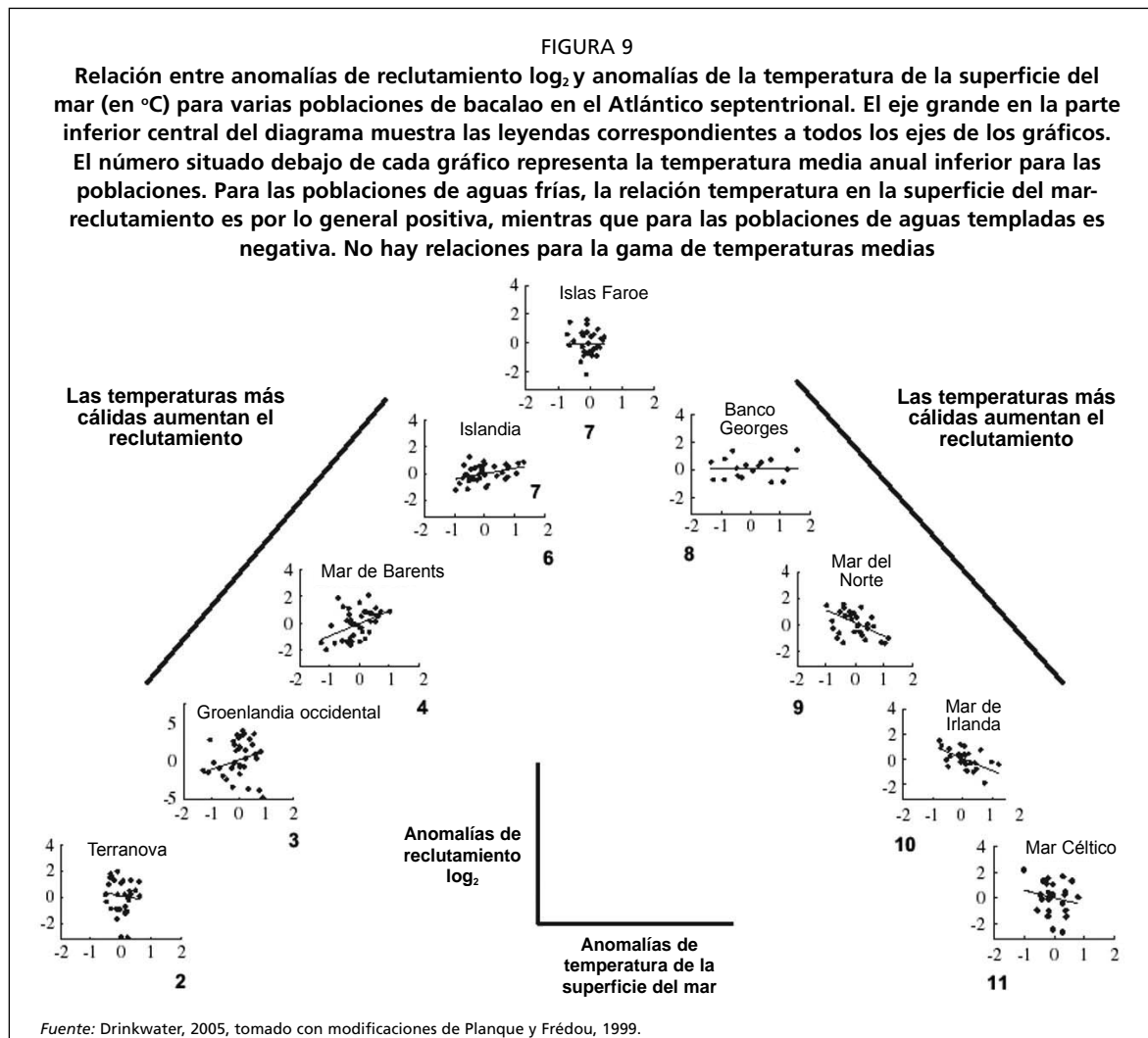
Mackas, Batten y Trudel (2007) observaron respuestas similares en la floración precoz del zooplancton y sus consecuencias en el crecimiento y supervivencia de los peces pelágicos, resultantes del recalentamiento del Pacífico oriental norte. La depredación es una causa de mortalidad alternativa a la inanición, y ambas pueden estar relacionadas en que las larvas que crecen más lentamente son más propensas a ser devoradas por los depredadores. La vulnerabilidad a la depredación de las larvas de peces depende de la tasa de encuentros depredador-presa (que es función de la abundancia, tamaño y velocidad de natación relativa y turbulencia del entorno) y de la propensión a la captura (Houde, 2001).

La dispersión física tiene que ver mayormente con los efectos de los procesos físicos –en particular la circulación– en la distribución de las especies acuáticas marinas y su capacidad de crecer, sobrevivir y desovar para completar adecuadamente su ciclo de vida. Dado que los fenómenos físicos juegan un papel directo en estos procesos, es probable que sufran las repercusiones de la variabilidad y del cambio climático. Tres hipótesis relacionan los efectos del clima directamente con el reclutamiento y la abundancia de las poblaciones de peces marinos: la hipótesis de la ventana ambiental óptima de Cury y Roy (1989), la hipótesis de la tríada de Bakun (1996) y la hipótesis del control oscilatorio de Hunt *et al.* (2002).

Según la hipótesis de Cury y Roy (1989), se asume que las especies están adaptadas a condiciones típicas («óptimas») dentro de sus hábitats preferidos. Esto supone que se podría esperar un mejor reclutamiento cuando predominan condiciones «medias» y no «extremas» (máximas o mínimas), es decir, una relación no lineal. El concepto de una ventana ambiental óptima de reclutamiento ha sido propuesto posteriormente para

diversas especies, incluido el salmón del Pacífico (Gargett, 1997). El concepto puede también aplicarse en un contexto espacial, de manera que se espera que las poblaciones que están en los bordes de la escala de adaptación se encuentran en una situación en la que experimentan condiciones marginales y su reclutamiento está determinado más por factores ambientales que las poblaciones que se encuentran a mitad de escala (Figura 9). Esta situación se ha comprobado respecto a 62 poblaciones de peces marinos pertenecientes a 17 especies en el Atlántico nororiental (Brunel y Boucher, 2006).

La hipótesis de la tríada de Bakun (1996) postula que en los hábitats apropiados deben imperar condiciones óptimas en los procesos de enriquecimiento (surgencia, mezcla, etc.), de concentración (convergencia, frentes, estabilidad de la columna de agua) y de retención para que el reclutamiento se lleve a cabo óptimamente. Los lugares en que coexisten estos tres elementos, que configuran hábitats ictiológicos favorables, se llaman «tríadas oceánicas». Como los procesos de enriquecimiento, concentración y retención están en oposición unos con otros, la hipótesis de la tríada supone asimismo una dinámica no lineal, con arreglo a la cual las condiciones óptimas para cada uno de los componentes se dan en un lugar mediano de la escala potencial. Esta hipótesis fue propuesta por Bakun (1996) para el atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*), la sardinela del Japón (*Sardinops melanostictus*), el atún blanco (*Thunnus alalunga*) y varias especies de peces de fondo en el Pacífico septentrional, y la anchoa (*Engraulis spp.*) en el Atlántico sudoccidental. Más tarde se ha aplicado a la anchoa (*Engraulis ringens*) en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a las costas de Perú (Lett *et al.*, 2007), la sardina (*Sardinops sagax*) en el ecosistema de Benguela



meridional (Miller *et al.*, 2006), y la anchoa en el Mediterráneo (Agostini y Bakun, 2002). Dado que estos sistemas se apoyan en condiciones óptimas respecto a procesos que por lo demás están en oposición recíproca, es probable que sean susceptibles a padecer perturbaciones o alteraciones sistemáticas ligadas al cambio climático.

La hipótesis del control oscilatorio (Hunt *et al.*, 2002) fue elaborada para el mar de Bering meridional. Postula que el ecosistema pelágico es impulsado por procesos de producción planctónica durante los años fríos, pero sobre todo por fenómenos de depredación durante los períodos templados. En años fríos, la producción de colín de Alaska (*Theragra chalcogramma*) se reduce a causa de las bajas temperaturas y las escasas reservas de alimento. A comienzos del período templado, la intensa producción de plancton fomenta un buen reclutamiento, pero a medida que aumenta la abundancia de colín adulto el reclutamiento se reduce a causa del canibalismo y la destrucción causada por otros depredadores. Una repercusión comparable del clima en el control trófico oscilatorio se ha observado también en el bacalao del Pacífico (*Gadus macrocephalus*) y en cinco especies de presas en el Pacífico septentrional (Litzow y Ciannelli, 2007).

2.2 Producción primaria

2.2.1 Océano Mundial

En términos generales, los resultados derivados de los modelos apuntan a que es probable que a causa del cambio climático la estratificación vertical y la estabilidad de la columna de agua en los océanos y lagos aumenten y se reduzca la disponibilidad de nutrientes en la zona eutrófica, lo que por consiguiente limitará la producción primaria (Falkowski, Barber y Smetacek, 1998; Behrenfeld *et al.*, 2006) y secundaria (Roemmich y McGowan, 1995). El enlace oceánico clima-plancton es más fuerte en los trópicos y en las zonas de latitud media, donde la mezcla vertical es débil porque la columna de agua se ha estabilizado por estratificación térmica (es decir que las aguas ligeras y templadas han recubierto las densas y frías). En estas zonas, el crecimiento del fitoplancton es escaso porque en las aguas superficiales los nutrientes habitualmente no abundan. Es más, el recalentamiento climático inhibe la mezcla de aguas, reduce el suministro de nutrientes en las zonas altas y ocasiona el descenso de la productividad (Doney, 2006). Sin embargo, para algunas regiones (p. ej., las altas latitudes) se ha propuesto un mecanismo de compensación en virtud del cual el tiempo de permanencia de las partículas en la zona eutrófica aumentaría, siempre que el suministro de nutrientes se mantenga invariado (Doney, 2006).

Permiten apoyar los planteamientos anteriores observaciones que indican que, sobre la base de la comparación de datos acerca de la presencia de clorofila derivados de dos registros satelitales, se ha constatado una reducción del 6 por ciento en la producción oceánica primaria entre los primeros años del decenio de 1980 y los últimos del de 1990 (Gregg *et al.*, 2003). La extrapolación futura de las observaciones satelitales indica que en los trópicos y las zonas de latitud media la productividad biológica marina disminuirá considerablemente. Las observaciones realizadas en latitudes más altas parecen reflejar la intervención de los mecanismos de compensación mencionados, ya que, en el Atlántico nororiental por ejemplo, el índice de clorofila ha aumentado desde mediados del decenio de 1980 (Raitos *et al.*, 2005; Reid *et al.*, 1998; Richardson y Schoeman, 2004).

La predicción de los impactos del cambio climático en la producción primaria y secundaria está sujeta a factores de incertidumbre relacionados con los procedimientos de parametrización utilizados en los modelos biogeoquímicos. En un importante estudio comparativo, Sarmiento *et al.* (2004) simularon con seis modelos de circulación general atmósfera-océano las consecuencias producidas por las emisiones de gases de efecto invernadero, comparando las hipótesis de emisiones del período preindustrial con el período 2050-2090 y agregando un elemento de control en el cual las emisiones

se mantenían en los niveles que habían alcanzado en la época preindustrial. Los modelos permitieron evaluar los cambios en la distribución de la clorofila y la producción primaria referidos a la temperatura, la salinidad y la densidad en la superficie del mar, la surgencia, la estratificación y la banquisa. Las alteraciones pronosticadas en el suministro de nutrientes y la producción, inducidas por el cambio climático, son predominantemente negativas debido a la escasa mezcla vertical. Sin embargo, en las regiones de alta latitud, la consiguiente estabilización de la columna de agua y la prolongación de la temporada de crecimiento tendrán efectos positivos en la producción (Figura 10). La producción primaria fue calculada para un conjunto de siete biomas, que se subdividieron en provincias biogeográficas. Con arreglo a las estimaciones mundiales se predijo un pequeño aumento en la producción primaria en todo el mundo con valores comprendidos entre el 0,7 y 8,1 por ciento, con muy amplias diferencias entre las regiones (Tabla 1). Por ejemplo, las disminuciones en el Pacífico septentrional y el área adyacente a la Antártica quedarían compensadas ligeramente por los aumentos que se registrarían en el Atlántico septentrional y el océano Meridional abierto.

Bopp *et al.* (2005) usaron un modelo multinutrientes y de comunidades multiplanctónicas para predecir una reducción de 15 por ciento en la producción primaria mundial en $4xCO_2$ niveles en el que los valores se equilibraban en virtud de un incremento en las zonas de alta latitud debido a una temporada de crecimiento más larga, y un decremento en las de baja latitud, debido a la disminución del suministro de nutrientes. Los resultados sugieren que el cambio climático acarrea un mayor agotamiento de nutrientes en la superficie del océano que favorece el desarrollo del fitoplancton pequeño a expensas de las diatomeas; y que la abundancia relativa de estas

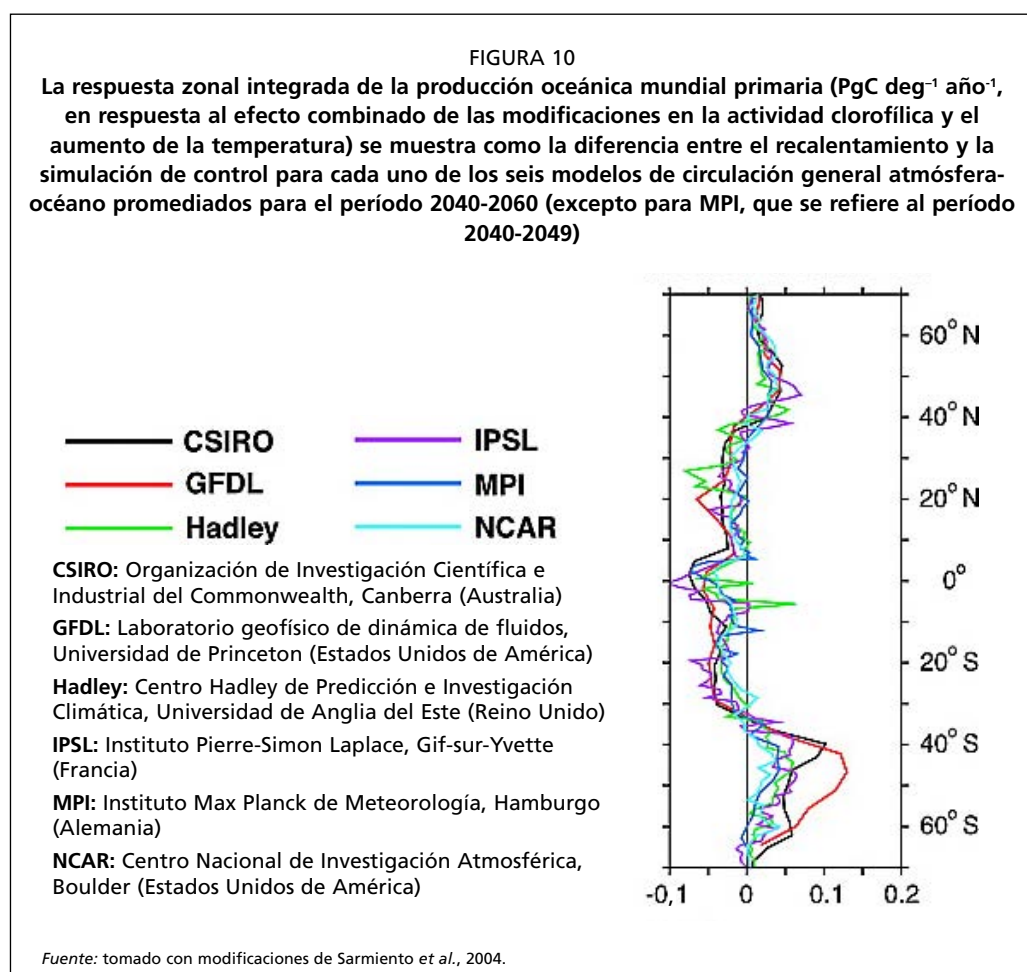
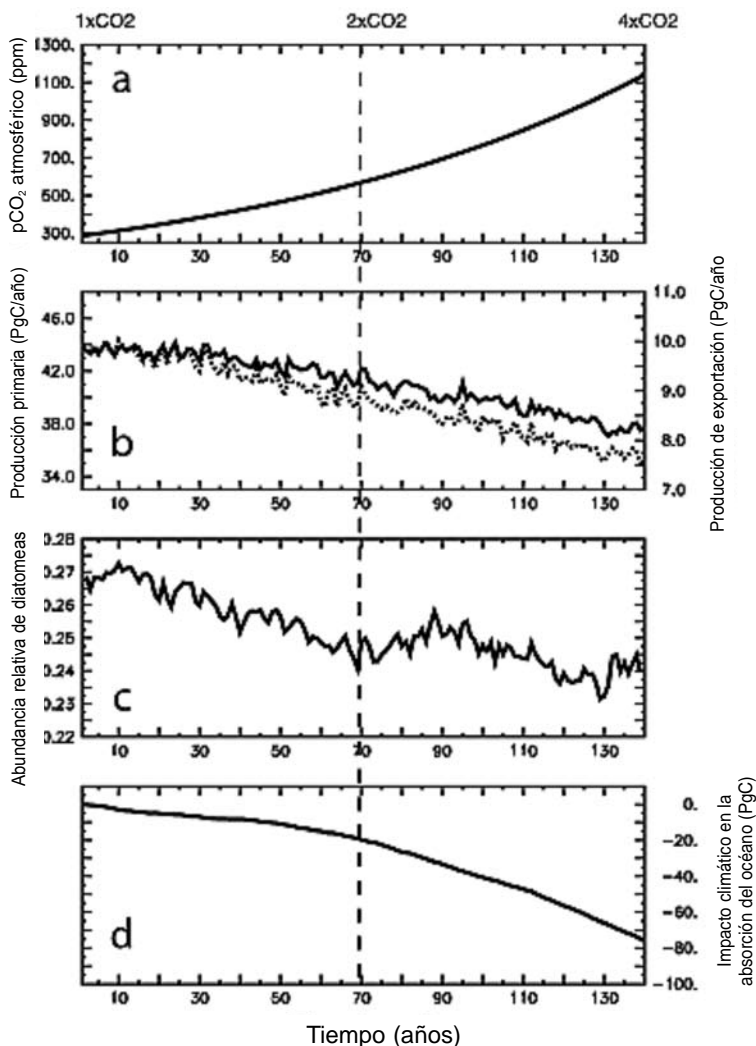


TABLA 1
Respuesta promedio de las provincias biogeográficas a las variaciones promediadas del calentamiento mundial durante el período 2040-2060 (tomado de Sarmiento et al., 2004). Las áreas se dan en 1012 m². «Var» es la diferencia entre el calentamiento promedio según el modelo, menos el control; «Var%» es la variación porcentual

	Océano Índico			Océano Pacífico			Océano Atlántico			Mundial		
	Control	Var	Var%	Control	Var	Var%	Control	Var	Var%	Control	Var	Var%
<i>Hemisferio norte</i>												
Hielo marino en zonas marginales				3,8	-1,7	-45,3	3,2	-1,2	-37,5	7,0	-2,9	-41,7
Subpolar				8,5	1,2	13,9	5,5	1,1	19,7	14,0	2,3	16,2
Subtropical estacional				4,9	-0,7	-13,4	8,8	-0,8	-9,4	13,6	-1,5	-10,9
Subtropical permanente	3,3	0,1	2,3	35,4	1,0	2,9	12,5	0,9	7,4	51,2	2,0	4,0
Surgencia en zonas de baja latitud	2,1	-0,1	-6,8	10,9	0,2	1,6	4,4	0,0	0,8	17,3	0,1	0,4
<i>5 °S to 5 °N</i>												
Surgenci	4,5	0,5	10,1	14,6	0,2	1,3	4,6	0,1	2,4	23,7	0,7	3,2
Contra-surgencia	2,3	-0,5	-19,5	4,4	-0,2	-4,3	1,3	-0,1	-10,9	7,7	-0,8	-9,7
<i>Hemisferio sur</i>												
Surgencia en zonas de baja latitud	7,9	-0,1	-0,7	8,7	-0,6	-7,3	3,8	0,2	4,8	20,4	-0,5	2,5
Subtropical permanente	15,0	1,1	7,3	37,4	3,6	9,7	13,9	1,5	10,8	66,3	6,2	9,4
Subtropical estacional	13,8	-0,5	-3,3	12,1	-1,8	-14,7	6,4	-1,2	-18,4	32,3	-3,4	-10,6
Subpolar	8,2	1,5	18,7	12,5	0,4	3,3	7,1	0,2	3,4	27,8	2,2	7,9
Hielo marino en zonas marginales	8,8	-2,1	-23,7	8,8	-1,5	-16,9	7,8	-0,8	-10,3	25,3	-4,4	-17,2
TOTAL	65,8			161,9			79,3			306,7		

últimas se reduce en más de 10 por ciento a nivel mundial y en hasta 60 por ciento en el Atlántico septentrional y el Pacífico sub-Antártico (Figura 11). Vale la pena observar que este cambio simulado en la estructura del ecosistema repercute en la absorción oceánica del carbono porque la bomba biológica funciona menos eficientemente y que esto contribuye por consiguiente a una retroalimentación positiva entre efectos del cambio climático y el ciclo del carbono oceánico. Análogamente, Boyd y Doney (2002) recurrieron a un modelo ecosistémico complejo que comprendía un factor de limitación para diversos nutrientes (N, P, Si, Fe) y una estructura planctónica comunitaria dotada de grupos geoquímicos funcionales, es decir diatomeas (flujo de salida y zahorra), diazótrofos (fijación de nitrógeno) y organismos calcificadores (alcalinidad y zahorra). Mediante este modelo pronosticaron una disminución del 5,5 por ciento de la producción mundial primaria y una disminución del 8 por ciento de la nueva producción mundial debido al aumento de la estratificación y a la ralentización del

FIGURA 11
Series cronológicas de a) CO₂ atmosférico (ppm), que aumenta al ritmo de 1 por ciento año⁻¹, b) productividad oceánica mundial primaria (línea continua) en PgC año⁻¹ (eje izquierdo) y producción de exportación de materia particulada a 100 m en el océano Mundial (línea de puntos) en PgC a⁻¹ (eje derecho), c) aporte mundial medio de diatomeas al contenido total de clorofila oceánica y d) efecto acumulativo del cambio climático en la absorción de carbono del océano (PgC)



Fuente: Bopp et al., 2005.

volcado termohalino. Los autores concluyeron que los cambios florísticos regionales podían ser tan importantes como los cambios en la productividad conjunta (véase también Leterme *et al.*, 2005).

Como se ha señalado en la Sección 1.3.2, es preciso advertir que las anteriores predicciones mundiales están basadas en simulaciones en gran escala, con una resolución que no permite elucidar los procesos de surgencia costera. Si el cambio climático llegara a ocasionar repercusiones significativas en ésta, los pronósticos sobre producción planctónica deberán ser revisados.

Vázquez-Domínguez, Vaquer y Gasol (2007) determinaron experimentalmente los efectos de un aumento de 2,5 °C de la temperatura del mar en la producción y respiración bacterianas a lo largo del ciclo estacional en un lugar costero del Mediterráneo. Los resultados indican que la demanda total de carbono aumenta en casi el 20 por ciento en el plancton microbiano costero sin causar efecto alguno en la eficiencia de su crecimiento; esto podría dar lugar a una retroalimentación positiva entre recalentamiento costero y producción de CO₂.

En otro estudio reciente, en el que se combinan la modelización y las pruebas empíricas, se revisan las consecuencias para la producción mundial primaria de la perturbación de la circulación de la corriente de volcamiento en el Atlántico meridional y se llega a la conclusión de que es posible que se registre una reducción del 50 por ciento en la producción primaria en el Atlántico septentrional y una reducción del 20 por ciento en la exportación mundial de carbono, y que esto ha sido característico de épocas glaciares anteriores (Schmittner, 2005). Aunque las conclusiones de estos dos estudios parecen ser muy diferentes, sus resultados son probablemente compatibles entre sí si se toman en consideración las diferencias en las escalas temporales y los procesos. En el modelo de Schmittner, el descenso giratorio de la corriente de volcamiento es relativamente lento y ocurre a lo largo de un período de 500 años, pero existen pruebas de que los cambios pueden ser más rápidos (Cubash *et al.*, 2001) y que una reducción en la corriente de volcamiento meridional puede ya haber comenzado tanto en el Atlántico septentrional (Curry y Mauritzen, 2005) como en el Pacífico septentrional (McPhaden y Zhang, 2002). Como incluso un detenimiento parcial de la corriente de volcamiento del Atlántico meridional puede ocasionar una reducción de productividad importante, resulta evidente que las causas, probabilidad y consecuencias de este fenómeno deben ser estudiadas con atención (Kuhlbrodt *et al.*, 2005).

2.2.2 Repercusiones regionales

Las proyecciones de la respuesta biológica del océano al cambio climático para 2050 muestran, en los hemisferios norte y sur, contracciones de 42 y 17 por ciento del muy productivo bioma marginal del hielo marino (Sarmiento *et al.*, 2004; véase también Meehl *et al.*, 2007; Christensen *et al.*, 2007). En este bioma tiene lugar una gran proporción de la producción primaria en aguas polares y de él depende una importante cadena trófica. Dado que la fecha de aparición del fitoplancton vernal se vincula con el borde de hielo marino, la pérdida de hielo marino (Walsh y Timlin, 2003) y las fuertes disminuciones de producción primaria total en dicho bioma en el hemisferio norte (Behrenfeld y Falkowski, 1997; Marra, Ho y Trees, 2003) podrían causar grandes alteraciones de productividad en el mar de Bering (Stabeno *et al.*, 2001). El calentamiento climático podría determinar también una expansión del bioma permanentemente estratificado de baja productividad en el giro subtropical, que en el hemisferio norte sería de 4,0 por ciento y en el hemisferio sur de 9,4 por ciento. Entre ambos, la expansión del bioma del giro subpolar es de 16 por ciento en el hemisferio norte y de 7 por ciento en el hemisferio sur. Entre ambos hemisferios, el bioma del giro subpolar se expande en 16 por ciento en el hemisferio norte y en 7 por ciento en el hemisferio sur, y el giro subtropical de estratificación estacional se contrae en 11 por ciento en ambos hemisferios. La expansión de los biomas del giro subtropical ya ha

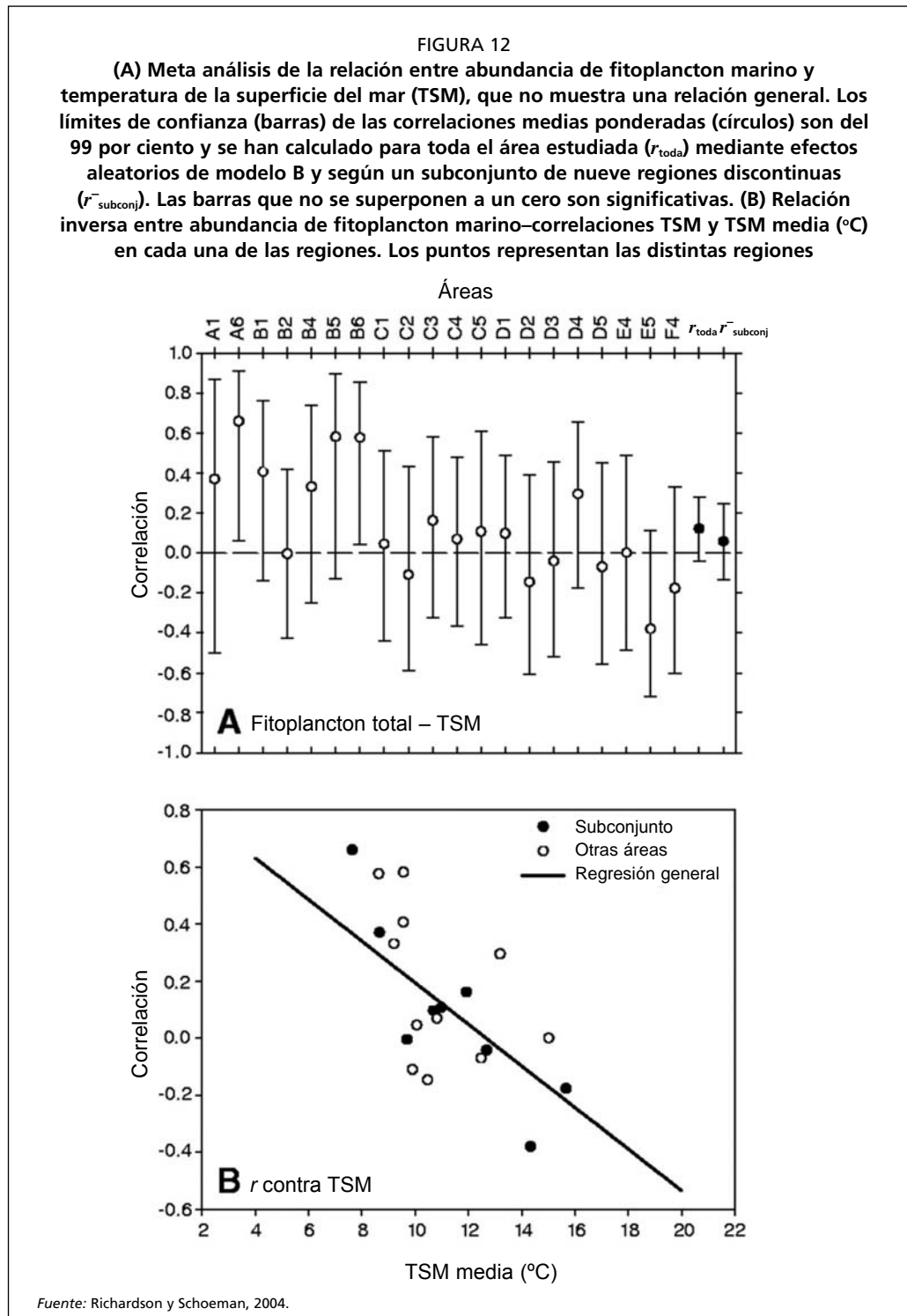
sido observada en el Pacífico septentrional y en el Atlántico (McClain, Feldman y Hooker, 2004; Sarmiento *et al.*, 2004; Polovina, Howell y Abecassis, 2008).

A escalas menores, el recalentamiento puede causar aumento o disminución de la productividad, de acuerdo con el proceso atmósfera-océano dominante. Por ejemplo, a causa del recalentamiento mundial se han intensificado los vientos monzónicos y, debido a la mayor intensidad de los fenómenos de surgencia, la biomasa planctónica estival promedio ha aumentado en más de 350 por ciento en la costa del mar Arábigo y en 300 por ciento costa afuera (Goes *et al.*, 2005). Por lo tanto, es probable que el recalentamiento convierta el mar Arábigo en un mar más productivo.

Hashioka y Yamanaka (2007) modelizaron la región del Pacífico noroccidental según un escenario de recalentamiento mundial, prediciendo un incremento en la estratificación vertical y un decremento en la concentración de nutrientes y clorofila α en la superficie del agua para finales del siglo XXI. Resulta significativo el hecho de que debido al recalentamiento mundial y por efecto del reforzamiento de la estratificación, el comienzo de la floración de las diatomeas en primavera se pronostica para 15 días antes que en las simulaciones actuales. Se predice también que, en comparación con las condiciones presentes, la biomasa total disminuirá considerablemente durante la floración de primavera. Por el contrario, la biomasa máxima del resto del pequeño fitoplancton de finales de floración de primavera se mantendrá invariable respecto a su volumen actual gracias a su adaptabilidad a un ambiente de escasos nutrientes (porque la constante de saturación media de las diatomeas es baja). Por lo tanto, el cambio en el grupo de fitoplancton dominante aparece claramente al final del período de floración de primavera. Hashioka y Yamanaka (2007) concluyen que las variaciones inducidas por el recalentamiento no ocurrirán uniformemente en todas las estaciones sino que serán más notables a finales de la primavera y durante la floración de otoño.

Un estudio basado en más de 100 000 muestras de fitoplancton recogidas entre 1958 y 2002 en el ámbito del programa de Registro Continuo de Plancton (Richardson y Schoeman, 2004) mostró que la abundancia de fitoplancton aumenta en las regiones más frías del Atlántico nororiental (al norte de los 55 °N) y disminuye en las más cálidas (al sur de los 50 °N; Figura 12). La explicación plausible de este resultado aparentemente contradictorio es que, si bien ambas zonas se han calentado a lo largo de este período, con una consiguiente reducción de la mezcla vertical, en las zonas más frías y turbulentas el suministro de nutrientes ha seguido siendo suficiente y el metabolismo planctónico se ha visto favorecido por el aumento de la temperatura. Con arreglo a otro estudio basado en datos provenientes del Registro, la variabilidad decádica observada en la biomasa planctónica en el Atlántico nororiental se atribuyó al forzamiento hidroclimático, tal como se evidencia en la oscilación del Atlántico norte (Edwards *et al.*, 2006). En el mar del Norte, este hecho dio origen a un cambio en el pico cromático estacional del fitoplancton, que de abril se trasladó a junio, y que puede haber estado acompañado por una traslación taxonómica, de diatomeas hacia dinoflagelados (Leterme *et al.*, 2005).

Se han elaborado modelos para entender los vínculos entre clima, producción primaria y secundaria y peces forraje y, en última instancia, entre estos elementos y el listado (*Katsuwonus pelamis*) y el rabil (*Thunnus albacares*) en el Pacífico tropical. Para el correcto funcionamiento de estos modelos es importante definir el hábitat idóneo del rabil y su relación con los regímenes variables de los principales índices climáticos: El Niño y la Niña (índice de oscilación sur) y la oscilación decádica del Pacífico que con éstos se asocia. Tanto el modelo estadístico como el modelo biogeoquímico acoplado (Lehodey, 2001; Lehodey, Chai y Hampton, 2003) han permitido confirmar la ralentización de la circulación meridional de volcamiento del Pacífico y la disminución de la surgencia ecuatorial, que son responsables de la reducción de cerca de 10 por ciento de la producción primaria y la biomasa entre 1976 y 1977 (McPhaden y Zhang, 2002).



En el mar de Bering sudoriental, la fecha de retirada de los hielos afecta a la floración vernal (Hunt *et al.*, 2002). Durante los años cálidos, en los que el repliegue de los hielos marinos se produce antes, la insuficiente luz impide la floración del fitoplancton y la estratificación es escasa a causa de los fuertes vientos invernales. De este modo, la floración se retrasa hasta que aumentan la luz y la estratificación. Por el contrario, cuando el repliegue de los hielos es tardío, la estratificación tiende a ser inducida por el derretimiento de los hielos, y la floración es posible porque hay suficiente luz.

Los arrecifes de coral son el hábitat de un ecosistema sumamente diversificado. Las temperaturas extremas del agua durante breves períodos pueden ocasionar la pérdida

de las algas simbióticas que viven en los corales lo que causa decoloración coralina. Si los corales no se recuperan, las algas suelen crecer por sobre éstos, y ello produce un ecosistema en el que las algas son dominantes. El descoloramiento generalmente ocurre cuando las temperaturas sobrepasan un «umbral» de aproximadamente 0,8 °C a 1 °C respecto a los niveles medios máximos de verano durante por lo menos cuatro semanas (Hoegh-Guldberg, 1999). Muchos corales constructores de arrecifes viven a una temperatura muy cercana a su límite máximo de tolerancia y son por lo tanto muy vulnerables a los efectos del recalentamiento (Hughes *et al.*, 2003; McWilliams *et al.*, 2005). Se tienen numerosos informes de casos de descoloramiento de corales por recalentamiento en los últimos tiempos (p. ej., Hoegh-Guldberg, 1999; Sheppard, 2003; Reaser, Pomerance y Thomas, 2000). La destrucción de los corales puede acarrear el declive de la biodiversidad de las comunidades de arrecife y de la abundancia de muchas especies (Jones *et al.*, 2004). Además, una de las consecuencias esperadas más evidentes del aumento del nivel de los mares será un desplazamiento de la zona de distribución de las especies hacia los polos. Sin embargo, en contraposición a la mayoría de las otras especies, no se cree que muchas especies de corales puedan seguir el ritmo pronosticado de aumento del nivel de los mares (véase Knowlton, 2001).

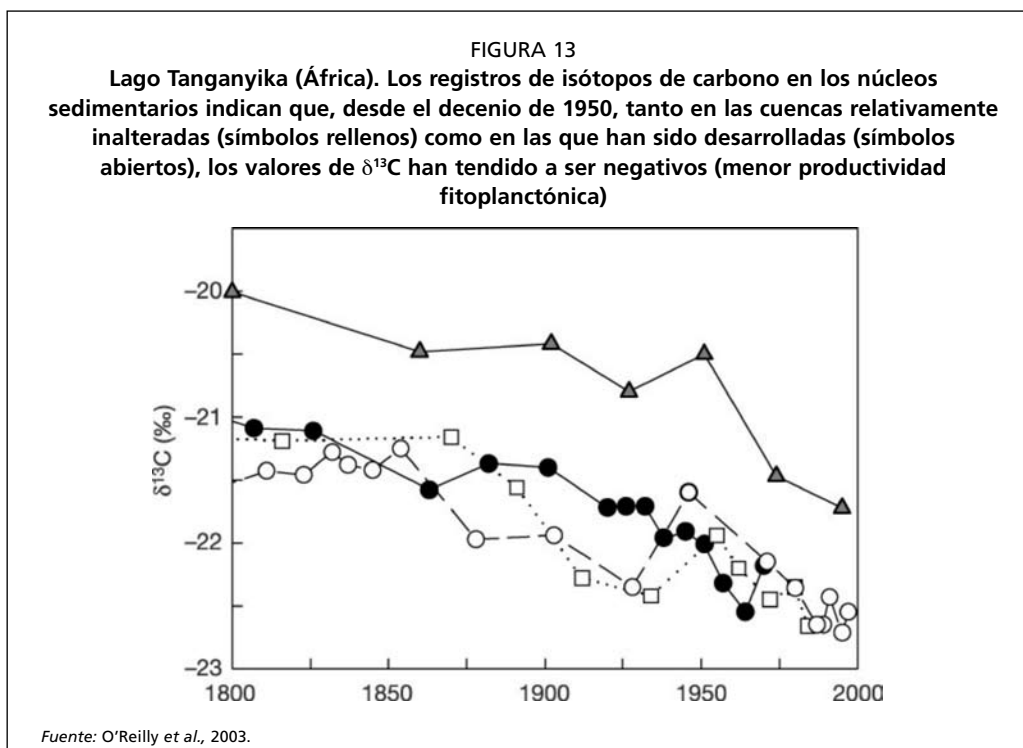
2.2.3 Aguas continentales

Así como sucede en los ambientes oceánicos, las repercusiones del recalentamiento mundial en la producción biológica en aguas continentales dependen estrechamente de una combinación de procesos contrastantes, tales como la formación de la banquisa, los flujos hídricos, la estratificación y la nitrificación, a los que se suman las repercusiones del uso del agua y de la tierra por el hombre.

En los lagos situados en altas latitudes o en altas altitudes, el recalentamiento atmosférico ya ha conducido a la reducción de la cubierta de hielo, al aumento de la temperatura del agua, a la prolongación de la temporada de crecimiento y, como consecuencia, al incremento de la abundancia y productividad de las algas (véase p. ej., Battarbee *et al.*, 2002; Korhola *et al.*, 2002; Karst-Riddoch, Pisaric y Smol, 2005). En correlación con el recalentamiento de las aguas y la extensión de la temporada de crecimiento, se ha registrado un aumento comparable en la abundancia del zooplancton (véase p. ej., Battarbee *et al.*, 2002; Gerten y Adrian, 2002; Carvalho y Kirika, 2003; Winder y Schindler, 2004b; Hampton, 2005; Schindler *et al.*, 2005). En los niveles tróficos superiores, el rápido aumento de la temperatura del agua tras la ruptura de los hielos ha estimulado el reclutamiento de peces en los lagos oligotróficos (Nyberg *et al.*, 2001). Estudios realizados a lo largo de un gradiente altitudinal en Suecia han mostrado que la productividad primaria neta puede incrementarse en un orden de magnitud por un aumento de la temperatura del aire de 6 °C (Karlsson, Jonsson y Jansson, 2005).

Por el contrario, algunos lagos, por ejemplo los tropicales profundos, están experimentando reducciones en la abundancia de algas y en productividad porque la intensificación de la estratificación reduce el ascenso de las aguas profundas ricas en nutrientes (Verburg, Hecky y Kling, 2003; Hecky, Bootsma y Odada, 2006). La productividad primaria en el lago Tanganyika puede haberse reducido en hasta un 20 por ciento a lo largo de los últimos 200 años (O'Reilly *et al.*, 2003, Figura 13). Vollmer *et al.* (2005) también han documentado el aumento de las temperaturas durante los últimos 60 años en el lago Malawi y medido la reducción de la ventilación de las aguas profundas desde 1980 (Vollmer, Weiss y Bootsma, 2002), fenómenos que han llevado a una reducción de la carga de nutrientes y, según cabe suponer, a una menor productividad.

Debido al aumento de la radiación UV-B y de las precipitaciones de verano, las concentraciones de carbono orgánico disuelto se incrementarán significativamente, con la consiguiente alteración de los principales ciclos biogeoquímicos (Zepp, Callaghan y Erickson, 2003; Phoenix y Lee, 2004; Frey y Smith, 2005).



2.3 Producción secundaria

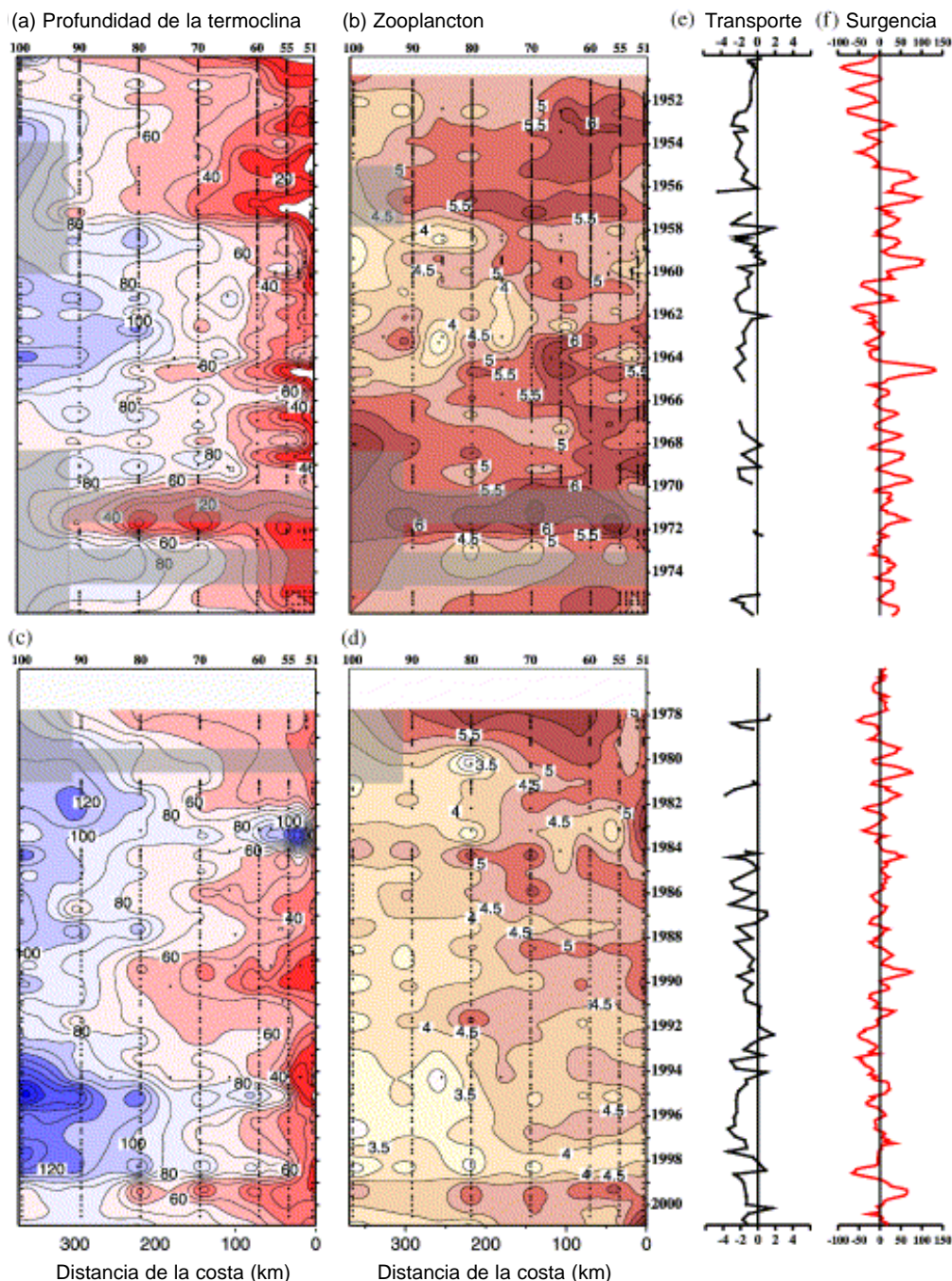
No existe en la actualidad una evaluación mundial de las repercusiones del cambio climático sobre la productividad secundaria, aunque Richardson (2008) proporciona un examen general de las repercusiones potenciales del calentamiento del clima en el zooplancton. Dadas sus características demográficas y debido a la duración de su ciclo vital (a menudo anual), el zooplancton marino –que rara vez se extrae con fines comerciales– es un buen candidato para una evaluación de los impactos rápidos del cambio climático: su situación facilita los análisis comparativos, ya que los factores del «ambiente» se pueden separar de las repercusiones ocasionadas por la pesca (Mackas y Beaugrand, 2008). Algunos patrones pueden ser deducidos de observaciones recientes realizadas a escala regional. Se han observado desplazamientos y tendencias en la biomasa planctónica en el Atlántico septentrional (Beaugrand y Reid, 2003), el Pacífico septentrional (Karl, 1999; Chávez *et al.*, 2003) y el océano Índico meridional (Hirawake, Odate y Fukuchi, 2005), entre otros, pero el alcance temporal y espacial de éstos es limitado.

Una de las causas de la dificultad de estimar los efectos del calentamiento en los productores secundarios es que las distintas etapas ontogénicas manifiestan diferentes grados de susceptibilidad al estrés ambiental (Pechenik, 1989). Sorprendentemente, las especies euritérmicas y específicamente termo-tolerantes mediana y altamente intermareales podrían en realidad ser más vulnerables al cambio climático que las especies menos termo-tolerantes porque sus procesos vitales se suelen desarrollar más cerca de sus límites fisiológicos (Harley *et al.*, 2006). Esta pauta puede ser válida igualmente a escala latitudinal, ya que las especies que se encuentran en latitudes bajas pueden vivir más cerca de sus límites térmicos que las que se encuentran en latitudes más altas (Tomanek y Somero, 1999; Stillman, 2002).

McGowan *et al.* (2003) indican que ha habido cambios significativos en el ecosistema asociado a la corriente de California, por ejemplo un gran declive decádico en la biomasa planctónica junto a un aumento de la temperatura en el océano superior (Figura 14). Concretamente, los autores señalan los bruscos cambios de temperatura que ocurrieron en torno a 1976 y 1977, asociados con la intensificación del sistema de bajas presiones

FIGURE 14

Gráficos de distancia-tiempo de la profundidad de la isoterma de 12 °C (m; un índice sustitutivo de la profundidad de la termoclina y de la profundidad de la nutriclina) delante de la costa de California (~34° N) para a) 1950-75 y c) 1976-2000, y log_e del volumen del macrozooplancton (cm³ 1 000 m⁻³) para b) 1950-75 y d) 1976-2000. Las regiones que requieren una interpolación o extrapolación significativa se han sombreado en gris; las áreas cercanas a la costa en blanco corresponden a los puntos de afloramiento de la isoterma de 12 °C. Las estaciones se han marcado con un punto y sus etiquetas figuran encima del eje de cada gráfico. Las series cronológicas de e) del volumen de transporte a lo largo de la costa (10⁶ m³ s⁻¹), calculadas entre las estaciones 80,55 y 80,90 para cada prospección, y f) índice mensual de anomalías de surgencia (m³ s⁻¹ 1 000 m⁻¹; período base 1946-1997), son estimaciones del transporte de Ekman mar afuera por estrés de viento geostrofico a lo largo de la costa en 34° N, 120° O, y se muestran a la derecha de los gráficos de distancia-tiempo



Fuente: McGowan et al., 2003.

de las Aleutianas, y que coincidieron con otros cambios que se observaron en toda la cuenca del Pacífico. Los resultados de los trabajos de McGowan *et al.* (2003) son coherentes con la hipótesis de la «ventana de estabilidad óptima» (Gargett, 1997), según la cual la estabilización de la columna de agua a lo largo del límite oriental del Pacífico septentrional tendría por efecto reducir (realzar) la producción biológica en latitudes sureñas (o norteñas), donde la productividad se ve limitada por un menor aporte de nutrientes (o de luz). Las tendencias evidenciadas en la producción biológica total pueden sin embargo ocultar las complejas repercusiones del cambio climático. Al investigar las anomalías que han tenido lugar en la abundancia del zooplancton a lo largo de un período de 15 años en Columbia Británica, Mackas, Thompson y Galbraith (2001) observaron que las anomalías de biomasa por especies son mucho más pronunciadas que las anomalías que afectan a la biomasa anual total, y reconocieron que la variabilidad de la estructura de la comunidad zooplanctónica era mayor de cuanto podrían hacer suponer las tendencias tomadas por su biomasa total.

Una de las repercusiones mejor estudiadas de la variabilidad y cambio climático en el zooplancton marino es la experimentada por la comunidad de copépodos del Atlántico septentrional, que es la que aporta hasta el 90 por ciento de la biomasa zooplanctónica en esa región. Esta especie está dominada por los copépodos calanoides congénéricos *Calanus finmarchicus* y *C. helgolandicus*. *C. finmarchicus* se localiza principalmente al norte del frente oceánico polar (Beaugrand e Ibáñez, 2004), mientras que la especie pseudo-oceánica *C. helgolandicus* se encuentra en aguas más templadas al sur del mencionado frente, sobre todo entre los 40 y 60 °N (Beaugrand e Ibáñez, 2004; Bonnet *et al.*, 2005). En las regiones donde ambas especies coexisten (p. ej., en el mar del Norte), éstas presentan por lo general una diferente cronología estacional (Beaugrand, 2003). La abundancia de *C. finmarchicus* ha disminuido en la mayor parte del Atlántico septentrional desde el decenio de 1950, y ha sufrido un desplome en el mar del Norte en beneficio de *C. helgolandicus* (Beaugrand *et al.*, 2002). Los procesos de transporte desde las cuencas de hibernación profundas hasta las regiones de plataforma continental determinan la distribución y abundancia de *C. finmarchicus* (Speirs *et al.*, 2005), asociándose generalmente una abundancia elevada con una mayor riqueza de nutrientes en las aguas del Atlántico, ya sea porque los niveles de producción primaria han aumentado o porque el transporte ha sido directo, o por una combinación de ambos factores (Astthorsson y Gislason, 1995). Últimamente, Helouet y Beaugrand (2007) han sugerido que los cambios de temperatura podrían haber sido por sí solos suficientes para afectar al nicho ecológico de ambas especies (*C. finmarchicus* reflejaría el destino del bioma Atlántico polar, y *C. helgolandicus* el del bioma de los vientos de poniente), lo que indicaría que las repercusiones del cambio climático a nivel del bioma son responsables del destino de estas especies. Los cambios en la dominancia de las especies se han traducido también en modificaciones fenológicas substanciales que afectan las interacciones tróficas, la estructura de la red trófica y el funcionamiento del ecosistema (Edwards y Richardson, 2004).

El krill antártico (*Euphausia superba*), una de las especies animales más abundantes de la Tierra, ha disminuido (desde el 38 hasta el 75 por ciento en una década) desde 1976 en el sector de alta latitud del Atlántico sudoccidental debido probablemente a la reducción del hielo marino invernal en torno a la península Antártica occidental (Atkinson *et al.*, 2004). El krill depende para subsistir de la muy productiva proliferación de fitoplancton de verano en el área que se extiende hacia el este de la península Antártica occidental y hacia el sur del frente polar. Los sálpidos, en cambio, que ocupan las extensas regiones de menor productividad del océano meridional y toleran más que el krill las aguas templadas, han aumentado en abundancia. Este cambio tiene consecuencias muy importantes para la red trófica del océano meridional, porque en este sistema el krill, y no los sálpidos, son el alimento principal de los pingüinos, focas y ballenas.

Es fundamental determinar las repercusiones que se manifiestan en las regiones en las que la vinculación de los productores secundarios a la producción pesquera es directa. Por ejemplo, la disminución de la importancia relativa de *Pseudocalanus* sp. en el Báltico, que se ha debido al calentamiento hidrográfico (MacKenzie y Schiedek, 2007), se ha relacionado con el tamaño y la condición de las poblaciones de peces (Möllmann, *et al.*, 2005). Isla, Lengfellner y Sommer (2008) investigaron en condiciones de laboratorio la respuesta fisiológica de *Pseudocalanus* sp. a diversos niveles de calentamiento por sobre la media decádica en el Báltico occidental, detectando un aumento de las tasas instantáneas de mortalidad y una reducción de la eficiencia de crecimiento neta ligada a la temperatura. Los autores pronosticaron que el aumento de la temperatura perjudicará a *Pseudocalanus* sp. y en consecuencia también a las poblaciones de peces en el mar Báltico.

El estudio más completo acerca de las repercusiones de la variabilidad climática en la producción del ecosistema marino –desde el zooplancton hasta los peces y desde las aguas inter-mareales hasta las aguas abiertas– es quizá el trabajo de Southward, Hawkins y Burrows (1995), que ha puesto de manifiesto muchos cambios en la abundancia en los taxones del Atlántico nororiental. Por último, Schmittner (2005) ha estimado que un trastorno en la circulación de volcamiento del Atlántico meridional conduciría al desplome de las poblaciones de plancton, que terminarían reduciéndose a menos de la mitad de su biomasa actual (véase la Sección 1.1.3).

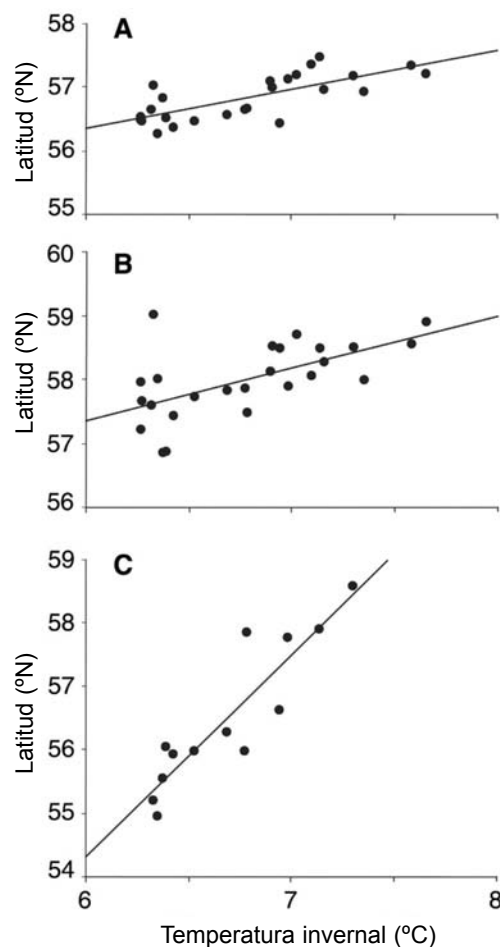
2.4 Cambios en la distribución

Por su influjo en las propiedades físicas de los ambientes marinos y acuáticos, los cambios climáticos desempeñan una función trascendental al definir el hábitat y la distribución de los peces marinos y acuáticos. Tales propiedades incluyen la temperatura, la salinidad, el ritmo de mezcla vertical y la circulación termohalina y eólica. Los índices de tolerancia ambiental (envolturas bioclimáticas), en consonancia con los cuales han evolucionado las poblaciones (véase p. ej. la Sección 2.1.1), se interrelacionan luego con estas condiciones ambientales que están controladas por el clima; se determinan así los hábitats preferidos o adecuados y la distribución de los organismos marinos y acuáticos.

Las investigaciones ecológicas y fisiológicas llevadas a cabo durante décadas documentan que las variables del clima juegan un papel de impulsores primarios en la distribución y dinámica del plancton y de los peces marinos (Hays, Richardson y Robinson, 2005; Roessig *et al.*, 2004). En correspondencia con las transformaciones regionales del clima oceánico, los registros de distribución mundial del plancton han mostrado notorios cambios en las comunidades fito y zooplanctónicas, así como la esperada translación hacia los polos de su ámbito de distribución geográfica, amén de cambios en el período de los picos de biomasa (Beaugrand *et al.*, 2002; deYoung *et al.*, 2004; Hays, Richardson y Robinson, 2005; Richardson y Schoeman, 2004). Algunas comunidades de copépodos se han desplazado no menos de 1 000 km hacia el norte. Beaugrand *et al.* (2002) han documentado una importante reorganización de las comunidades planctónicas, especialmente de crustáceos calanoides copépodos, en el este del océano Noratlántico y en las plataformas continentales de los mares europeos. En el caso de las especies de aguas templadas, se ha registrado una propagación en dirección norte de más de 10° de latitud a lo largo de los últimos 40 años, junto a una disminución en el número de especies de aguas más frías; estos fenómenos se asociaron tanto con la tendencia al aumento de las temperaturas en el hemisferio norte como con el índice de oscilación del Atlántico norte. Beaugrand *et al.* (2003) demostraron que, por conducto de tres procesos de control que tienen lugar en sentido ascendente desde el fondo (cambios en el tamaño medio de las presas, períodos estacionales y abundancia), que se suman a los efectos de la sobrepesca, estas fluctuaciones en la abundancia planctónica han ocasionado cambios en las tasas de reclutamiento del bacalao en el mar del Norte.

Se espera que, a causa del cambio climático, el ámbito de distribución geográfica de la mayor parte de las especies terrestres y marinas se desplace hacia los polos (Southward, Hawkins y Burrows, 1995; Parmesan y Yohe, 2003), tal como ocurrió durante el período de transición entre el Pleistoceno y el Holoceno (revisión de Fields *et al.*, 1993), aunque probablemente con amplitudes diferentes. Los desplazamientos de las comunidades de peces e invertebrados frente a las costas de América del Norte occidental y el Reino Unido han sido particularmente bien documentados. Estos dos sistemas presentan una situación de contraste interesante (véase más abajo), porque la costa occidental de América del Norte ha experimentado a lo largo de un período de 60 años un aumento significativo de las temperaturas del mar en las zonas de altura, mientras que la mayor parte de las costas del Reino Unido han sufrido un marcado enfriamiento durante los decenios de 1950 y 1960, calentándose solo a partir del de 1970 (Holbrook, Schmitt y Stephens, 1997; Sagarin *et al.*, 1999; Southward *et al.*, 2005). Se predice que las especies de mayor movilidad y capacidad migratoria, tales como las pelágicas pequeñas cuyos requisitos en materia de hábitat están definidos principalmente por características hidrográficas de temperatura y salinidad, responderán más rápidamente a la variabilidad climática interanual relacionada con su hábitat y distribución (Perry *et al.*, 2005; Figura 15). La mayor parte de los datos relativos al Atlántico septentrional,

FIGURA 15
Ejemplos de ámbitos de distribución de peces del mar del Norte que se han desplazado hacia el norte a causa del recalentamiento del clima. Se muestra la relación entre la latitud media y la media móvil de 5 años de las temperaturas invernales inferiores para (A) el bacalao, (B) el rape, y (C) el lumpeno



Fuente: Perry *et al.*, 2005.

mar del Norte y la costa del Reino Unido tienen una resolución excepcionalmente alta y se han integrado en series cronológicas muy largas, y por lo tanto proporcionan una información detallada sobre la variabilidad anual y las tendencias a largo plazo. A lo largo de 90 años, los períodos migratorios de los animales (p. ej. del calamar veteadado, *Loligo forbesi*, y la solla *Platichthys flesus*) han seguido las tendencias decádicas de la temperatura oceánica, atrasándose en las décadas frías y adelantándose hasta en uno o dos meses en los años cálidos (Southward *et al.*, 2005). La sardina (*Sardina pilchardus*) aumentó su producción de huevos en dos a tres órdenes de magnitud durante la reciente época de recalentamiento. En el mar del Norte, la abundancia de las especies adaptadas a las condiciones templadas (p. ej., la anchoa *Engraulis encrasicolus* y la sardina) ha aumentado desde 1925 (Beare *et al.*, 2004), y el ámbito de distribución de siete de ocho especies (p. ej., la faneca, *Trisopterus luscus*) se ha desplazado hasta 100 km hacia el norte por década (Perry *et al.*, 2005). Algunos de estos viajes son muy veloces y alcanzan un promedio de más de 2 km.año⁻¹ (Perry *et al.*, 2005). El extremo latitudinal superior de distribución del pez aguijón (*Entelurus aequoreus*), por ejemplo, se ha desplazado de Inglaterra meridional en 2003 a Spitzbergen en 2007 (Harris *et al.*, 2007). En el ambiente pelágico, los desplazamientos no solo son horizontales sino también verticales, y las especies responden a la tendencia al recalentamiento trasladándose a aguas más profundas y frías (Perry *et al.*, 2005; Dulvy *et al.*, 2008). Los registros relativos a los invertebrados inter-mareales que datan de 1934 muestran desplazamientos semejantes de las especies adaptadas a ambientes templados y fríos (p. ej., los percebes *Semibalanus balanoides* y *Chthamalus* spp., respectivamente) que reflejan los cambios decádicos en las temperaturas costeras (Southward, Hawkins y Burrows, 1995; Southward *et al.*, 2005).

Sagarin *et al.* (1999) vincularon un aumento de 2 °C de la temperatura de la superficie del mar en la bahía de Monterrey (California) entre 1931 y 1996 a un aumento significativo de las especies de ámbito de distribución sureño y a una disminución de las de ámbito norteño. Holbrook, Schmitt y Stephens (1997) observaron cambios análogos durante los últimos 25 años en las comunidades ícticas en hábitats de algas kelp frente a la costa de California. Existen también muchos casos de cambios en el ámbito de distribución debidos a la variabilidad climática interanual, relacionados en particular con eventos El Niño. En la costa de California, el área de desove de la anchoveta se expande hacia el norte durante los fenómenos de El Niño (Checkley *et al.*, 2009). Asimismo, el límite septentrional de distribución de las sardinas californianas en aguas del Canadá se relaciona estrechamente con la temperatura de la superficie del mar, y se expande hacia el norte entre junio y agosto para volver hacia el sur cuando el mar empieza a enfriarse (McFarlane *et al.*, 2005). Rodríguez-Sánchez *et al.* (2002) describieron cómo los hábitats principales de la sardina del Pacífico (*Sardinops caeruleus*) se modificaban en el sistema de la corriente de California, pasando del centro al sur y luego nuevamente al centro de su ámbito de distribución total durante el período comprendido entre 1931 y 1997 conforme los regímenes climáticos dominantes se iban alterando. Los hábitats que cruzan la plataforma continental también se ven afectados por las condiciones de productividad. El área de distribución geográfica de la sardina californiana en la temporada de desove muestra variaciones interanuales significativas, extendiéndose mar afuera durante La Niña y comprimiéndose en dirección a la costa durante El Niño (véase p. ej. Lynn, 2003).

En el sistema de surgencia de la corriente de California, la amplitud de las migraciones hacia el norte de la merluza del Pacífico (*Merluccius productus*) se correlaciona positivamente con el aumento de la temperatura del agua (Ware y McFarlane, 1995). Philips *et al.* (2007) también han observado una expansión hacia el norte de las áreas de desove de la merluza del Pacífico en el sistema de la corriente de California. La distribución de otras especies en las partes meridionales del sistema de dicha corriente y su relación con las variaciones de la oscilación de El Niño ha sido indicada por

Lluch-Belda, Lluch-Cota y Lluch-Cota (2005). Las variaciones experimentadas por la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) se han explicado por cambios en la capacidad de transporte (Csirke *et al.*, 1996) que dependen de los regímenes de productividad (Chávez *et al.*, 2003). En el Pacífico occidental, el listado (*Katsuwonus pelamis*) altera su pauta de distribución ajustándose a la zona de convergencia entre la piscina de agua caliente del Pacífico y el desplazamiento de la lengua fría del Pacífico oriental, en respuesta a los ciclos de El Niño (Lehodey *et al.*, 1997).

En los ecosistemas árticos se han observado traslaciones notables. Los conjuntos de diatomeas e invertebrados en los lagos árticos han evidenciado grandes rotaciones de especies, alejándose de las especies bentónicas para acercarse a las comunidades planctónicas de aguas templadas (Smol *et al.*, 2005). En el Ártico, la disminución de los hielos marinos ha tenido una distribución más regular que en el Antártico. Las poblaciones de osos polares (*Ursus maritimus*) han registrado descensos significativos en sus dos límites geográficos. En el límite sur de su área de distribución, los individuos están disminuyendo tanto en número como en peso corporal medio (Stirling, Lunn y Iacozza, 1999). Es probable que a causa del cambio climático los osos polares sean extirpados de muchas de las zonas en que son comunes en el presente, y que la población total acabe fragmentada en algunos grupos aislados (Wiig, Aars y Born, 2008). Los pingüinos y otras aves marinas de la Antártida han evidenciado respuestas drásticas a los cambios en la amplitud del hielo marino a lo largo del siglo pasado (Ainley *et al.*, 2003; Croxall, Trathan y Murphy, 2002; Smith *et al.*, 1999), en especial las especies que dependen de los hielos marinos tales como el pingüino adalaida y el pingüino emperador (*Pygoscelis adeliae* y *Aptenodytes forsteri*, respectivamente) (Gross, 2005; Barbraud y Weimerskirch, 2001; Emslie *et al.*, 1998; Fraser *et al.*, 1992). A largo plazo, el hábitat de las aves que dependen de los hielos marinos sufrirá una reducción general a medida que los hielos de barrera se contraen o derrumban. Por el contrario, hace entre 20 y 50 años, los pingüinos que se alimentan en mar abierto, como el pingüino barbijo (*Pygoscelis antarcticus*) y el pingüino papúa (*P. papua*), invadieron las zonas que se extienden hacia el sur a lo largo de la península Antártica, existiendo pruebas paleontológicas de que el papúa ha estado ausente de la región de Palmer durante los precedentes 800 años (Emslie *et al.*, 1998; Fraser *et al.*, 1992).

Si los cambios climatológicos persistieran, las especies demersales alterarían también sus patrones de distribución y migración. Sin embargo, como el hábitat de las especies demersales incluye a menudo propiedades particulares del fondo marino (tales como los bosques de kelp y los arrecifes de coral) y tipos varios de sedimentos (rocas o arena), es probable que los patrones de distribución de dichas especies se alteren más lentamente que los de las especies pelágicas. Esto indica que los cambios en la distribución de las especies demersales podrían usarse como índice de los cambios persistentes a largo plazo en las condiciones del hábitat. Estos cambios en gran escala, que se mantienen durante por lo menos algunas décadas, ya han ocurrido en el pasado. Los efectos de los fenómenos de recalentamiento en el Atlántico septentrional desde el decenio de 1920 hasta el de 1940 y más adelante han sido muy bien documentados (Cushing, 1982; Brander *et al.*, 2003; Rose, 2005; Drinkwater, 2006). Tåning (1949) y Fridriksson (1948) describieron cómo el bacalao del Atlántico (*Gadus morhua*), el eglefino (*Melanogrammus aeglefinus*), las gallinetas (*Sebastes* spp.) y el fletán negro (*Reinhardtius hippoglossoides*) se extendieron hacia el norte, y que el bacalao se difundió 1 200 km más hacia el norte a lo largo de Groenlandia occidental respecto a su distribución anterior (Jensen, 1939, citado en Drinkwater, 2006). Estos cambios involucraron tanto a los invertebrados bentónicos como a los peces demersales (Drinkwater, 2006). En general, el ámbito de distribución de las especies adaptadas a las aguas templadas se expandió en dirección al norte, mientras que el de las especies adaptadas a aguas frías se contrajo en esa misma dirección. Más recientemente, se han observado importantes extensiones del ámbito de distribución de las especies marinas

de aguas tropicales y templadas en el Atlántico septentrional este (Quero, Du Buit y Vayne, 1998; Brander *et al.*, 2003) y en el mar del Norte (Brander *et al.*, 2003; Perry *et al.*, 2005; Clemmensen, Potrykus y Schmidt, 2007; Dulvy *et al.*, 2008).

Se ha sugerido (Harley *et al.*, 2006) que un debilitamiento de la advección costera asociada con el recalentamiento (Pisias, Mix y Heusser, 2001) podría en realidad echar abajo algunas barreras biogeográficas marinas que impiden en la actualidad la expansión del ámbito de distribución de las especies. Por ejemplo, el ámbito de distribución de dos especies de coral particularmente susceptibles al frío (el coral cuernos de ciervo, *Acropora cervicornis*, y el coral cuernos de alce, *Acropora palmata*) se ha expandido recientemente hacia el norte del Golfo de México (primera observación en 1998) de forma simultánea al aumento de la temperatura de la superficie del mar (Precht y Aronson, 2004). Aunque la prosecución de los desplazamientos hacia los polos se verá limitada en determinado momento por la disponibilidad de luz (Hoegh-Guldberg, 1999), los pequeños cambios de distribución pueden contribuir a crear nuevas zonas refugio en caso de futuros acontecimientos extremos de alteración de la temperatura de la superficie del mar.

El seguimiento prolongado de la presencia y distribución de una serie de organismos inter-mareales y de aguas someras en el sudoeste del Reino Unido ha mostrado varios patrones de cambio, en particular en el caso de los percebes, que coinciden ampliamente con los cambios en la temperatura registrados a lo largo de diversas décadas (Hawkins, Southward y Genner, 2003; Mieszkowska *et al.*, 2006). Resulta claro que las respuestas de estos organismos al cambio climático son más complejas que los cambios latitudinales simples que están relacionados con el aumento de la temperatura, puesto que existen complejas interacciones bióticas que se superponen a las interacciones abióticas (Harley *et al.*, 2006; Helmuth, Kingslover y Carrington, 2005). Se pueden citar como ejemplos la extensión hacia el norte de la distribución de los gasterópodos en California (Zacherl, Gaines y Lonhart, 2003) y la reaparición del mejillón común en Svalbard (Berge *et al.*, 2005).

2.5 Cambios en la abundancia

Los cambios en la abundancia y biomasa de las poblaciones marinas se deben a modificaciones en sus índices de reclutamiento y crecimiento y, en último término, a la capacidad productiva de la región que los alberga. Por ejemplo, los cambios de temperatura pueden tener repercusiones directas en la abundancia y biomasa porque la fisiología de los individuos sufre estrés (tal como se describió en la Sección 2.1), lo que los obliga a trasladarse a otros lugares, o en última instancia provoca su muerte. La temperatura puede también ejercer efectos indirectos en la abundancia ya que influye en el crecimiento y en los índices de reclutamiento. Las poblaciones que están en la parte más cercana a los polos de su área de distribución, tales como el bacalao del Atlántico en el mar de Barents, aumentan en abundancia con temperaturas más cálidas, mientras que las poblaciones que se encuentran más cercanas a las zonas ecuatoriales de su ámbito de distribución, tales como el bacalao en el mar del Norte, tienden a disminuir en abundancia a medida que las temperaturas aumentan (Ottersen y Stenseth, 2001; Sirabella *et al.*, 2001; Figura 9).

Las tasas de crecimiento individual más elevadas se traducen en una mayor productividad para toda la población, pero las poblaciones más productivas son aquellas que se encuentran en zonas en las que la temperatura y salinidad en el fondo del mar son más altas (Dutil y Brander, 2003). Sin embargo, Portner *et al.* (2001) encontraron que la tasa de crecimiento del bacalao era óptima a 10°C, independientemente de la latitud a que se encontrasen las poblaciones estudiadas. Este cuadro relativamente simple se complica cuando también se toma en consideración la disponibilidad de alimento. Dado que las temperaturas en aumento determinan un incremento en las necesidades metabólicas de los peces, es posible que un suministro de alimentos mayor, además de

temperaturas más altas, conduzca a un crecimiento más rápido y a mejores resultados de reclutamiento en las poblaciones que se encuentran en las zonas más ecuatoriales de su ámbito de distribución. Beaugrand *et al.* (2003) encontraron que el aumento del índice de presas planctónicas podía explicar el 48 por ciento de la variabilidad de reclutamiento del bacalao del mar del Norte, y que los períodos de buen reclutamiento coincidían con un aumento de abundancia de las presas preferidas. Las poblaciones de bacalao del mar de Irlanda y del Banco Georges contienen, por lo tanto, individuos de tamaños considerablemente mayores que los que viven frente a las costas del Labrador o en el mar de Barents (Brander, 1994). Estas conclusiones conducen a la hipótesis que, en el caso del bacalao en el Atlántico septentrional, el índice de reclutamiento de las poblaciones que están en aguas frías es superior cuando las temperaturas aumentan, pero que el aumento de las temperaturas reduce el reclutamiento en las poblaciones que están en aguas templadas (Planque y Frédou, 1999; Figura 9). Sin embargo, cuando el suministro de alimento es abundante, las poblaciones que se encuentran en las áreas sureñas pueden superar los efectos de la intensificación metabólica debida a las temperaturas más cálidas, y aprovechar el aumento de los recursos alimenticios para incrementar su tasa de crecimiento. Pero esta relación puede no ser válida cuando las temperaturas más altas también causan cambios en la composición de las especies de plancton, de modo que su calidad energética alimentaria disminuye. Por ejemplo, Omori (1969) registró una relación carbono-nitrógeno más baja en el zooplancton del Pacífico tropical cálido en comparación con la que registró en el Pacífico sub-Ártico más frío.

Taylor y Wolff (2007) han propuesto que la diferencia en la calidad del plancton sería el factor que explicaría la excepcional producción de anchoveta en el sistema de surgencias de Perú. En resumen, las temperaturas más cálidas intensifican las tasas metabólicas; pero, en el caso de las poblaciones que se encuentran en las partes ecuatoriales de su ámbito de distribución, la insuficiencia o la mala calidad del alimento determinan que decline tanto el índice de reclutamiento como el crecimiento. Los estudios realizados en sistemas de agua dulce muestran resultados similares; por ejemplo, que la tasa de crecimiento de las especies de aguas frescas o frías como la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), el coregono (*Coregonus commersoni*) y la gallineta (*Perca* spp.) aumenta en respuesta al incremento de la temperatura solo cuando el suministro de alimento es adecuado para satisfacer esta mayor demanda (Ficke, Myrick y Hansen, 2007).

En la Sección 1.3 se señaló que a causa del recalentamiento mundial la intensidad de los monzones ha aumentado y que, a consecuencia del aumento de los fenómenos de surgencia, la biomasa planctónica promedio en verano ha aumentado en el mar Árabe (Goes *et al.*, 2005). Se espera que la intensificación de los ciclos hidrológicos en esta región influya también en los procesos limnológicos. El derretimiento de las nieves y glaciares en las montañas eurasiáticas puede traducirse en cambios en los flujos de los ríos Indo, Brahmaputra, Ganges y Mekong, que sostienen las grandes pesquerías fluviales y de llanos inundables y suministran nutrientes a los mares costeros. Las predicciones acerca de las consecuencias en los regímenes de flujo son inciertas, pero el aumento de la escorrentía y de la descarga puede estimular el rendimiento íctico debido a que la inundación de los llanos será más extensa y prolongada. En Bangladesh, un aumento del 20 a 40 por ciento de las áreas inundadas podría determinar un incremento de los rendimientos anuales totales de entre 60 000 a 130 000 toneladas. Estas ganancias potenciales podrían verse contrarrestadas por pérdidas mayores durante la estación seca debidas a la reducción de los flujos y a una mayor demanda de agua de riego; esto amenazaría la supervivencia de los peces y los expondría a una más fácil captura. La construcción de embalses hidroeléctricos y presas para irrigación y control de inundaciones podría igualmente contrarrestar las potenciales ganancias pesqueras (Mirza, Warrick y Ericksen, 2003).

El declive reciente de la abundancia de peces en los lagos del valle del Rift en África oriental se ha asimilado al impacto climático sufrido por los ecosistemas lacustres (O'Reilly *et al.*, 2003). El lago Tanganyika en particular se ha caracterizado, a lo largo de la historia, por encerrar una de las pesquerías pelágicas más productivas del mundo. La caída del 30 a 50 por ciento en las capturas de clupeidos desde finales del decenio de 1970 se ha atribuido en parte a factores ambientales, porque en el lago los rendimientos se habían mantenido elevados en condiciones de presión pesquera similares durante los anteriores 15 a 20 años, aunque al respecto se han expresado opiniones divergentes (Sarvala *et al.*, 2006). La merma de las capturas ha estado acompañada de la interrupción de los elevados patrones estacionales previos de captura, lo que indica que éstas serían independientes de procesos ecosistémicos impulsados por pautas hidrodinámicas debilitadas. Estos cambios en la pesquería pelágica son coherentes con las modificaciones en el funcionamiento de todo el ecosistema lacustre (O'Reilly *et al.*, 2003).

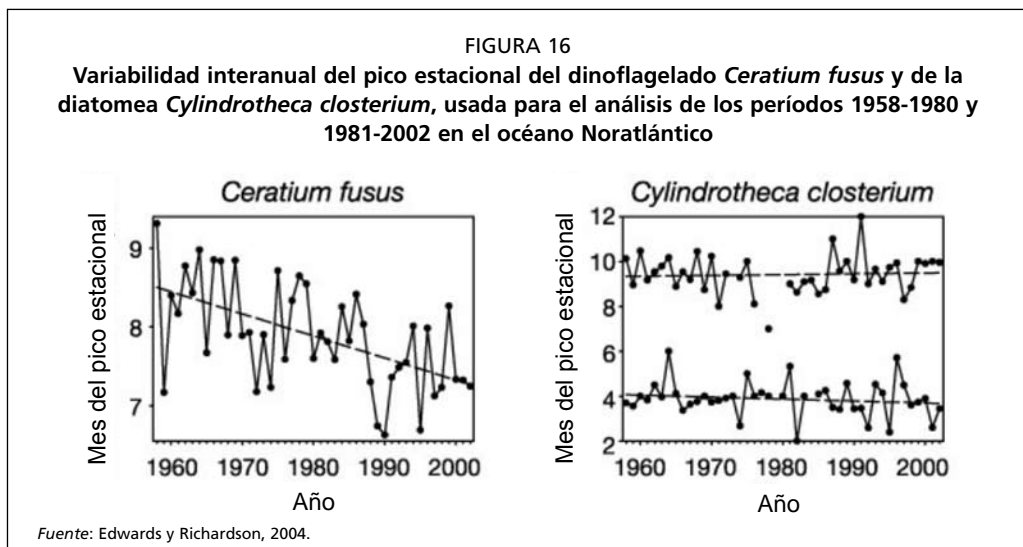
En los ecosistemas de agua dulce, una de las repercusiones más notorias del recalentamiento mundial sería la reducción de los hábitats aptos. En un estudio de simulación en el que se duplicó el CO₂ atmosférico, Mohseni, Stefan e Eaton (2003) calcularon una reducción de 36 y 15 por ciento del hábitat térmico idóneo para las especies de aguas frescas y frías, respectivamente, mientras que el hábitat para las especies de aguas templadas aumentaría en 31 por ciento. Este estudio estuvo basado en la tolerancia térmica máxima y mínima de 57 especies en 764 estaciones fluviales en los Estados Unidos de América.

2.6 Cambios fenológicos

Según estimaciones de Parmesan y Yohe (2003), a lo largo de los últimos 20 a 140 años, más de la mitad (59 por ciento) de 1 598 especies terrestres, de agua dulce o marinas han manifestado cambios fenológicos y/o de distribución medibles. Tales cambios tuvieron lugar sistemática y predominantemente en la dirección esperada correspondiente a las modificaciones regionales sufridas por el clima (Parmesan y Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003). Un resultado sorprendente ha sido que una gran proporción de las especies ha respondido a cambios climáticos recientes relativamente suaves (un recalentamiento mundial de 0,6 °C en promedio). La proporción de las especies silvestres que habían sufrido los efectos del cambio climático se estimó en el 41 por ciento de las estudiadas (655 de 1 598; Parmesan y Yohe, 2003).

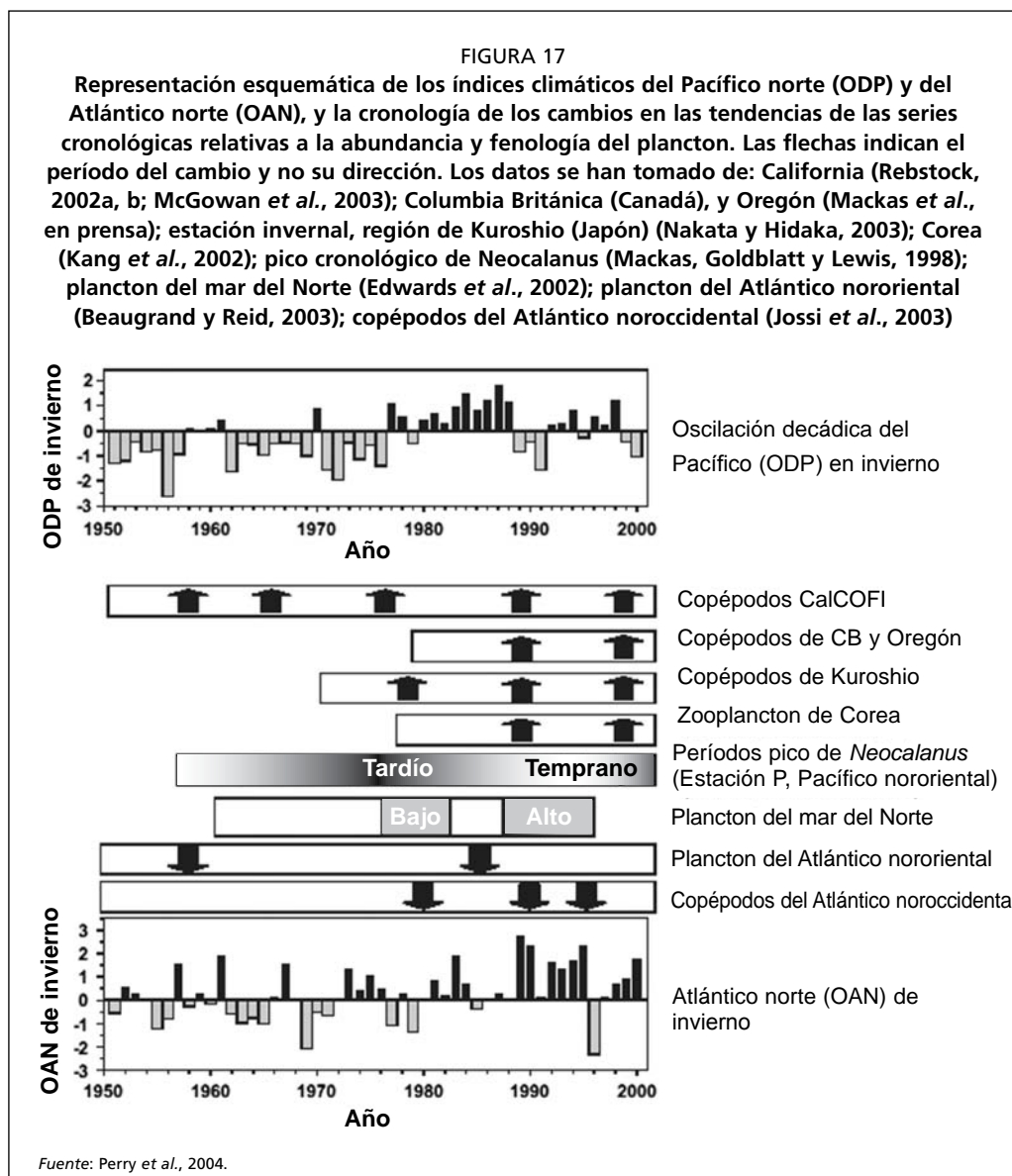
2.6.1 Ambientes oceánicos

Los cambios en el período de floración de los productores primarios y secundarios pueden causar desfases respecto a sus depredadores (hipótesis de la concordancia y discordancia propuesta por Cushing [1969], Sección 2.1.3). La eficiencia en la transferencia de la producción marina primaria y secundaria a los niveles tróficos superiores, tales como las especies de peces comercialmente importantes, depende principalmente del sincronismo temporal entre picos de producción trófica sucesivos en los sistemas templados. Por ejemplo, tanto en el Pacífico oriental norte (Mackas, Batten y Trudel, 2007) como en Atlántico nororiental (Greve *et al.*, 2004, 2005), la cronología demográfica del zooplancton está estrechamente relacionada con la temperatura encontrada por el zooplancton juvenil a comienzos de la primavera. Preocupa el hecho de que el recalentamiento de los mares pueda haber ya alterado radicalmente los procesos trofodinámicos marinos debido a relaciones depredador-presa asincrónicas (Stenseth y Mysterud, 2002; Abraham y Sydeman, 2004; Edwards y Richardson, 2004; Visser y Both, 2005). En el mar del Norte, por ejemplo, el pico estacional de los dinoflagelados se ha adelantado casi un mes, mientras que las diatomeas no han mostrado un patrón de cambio coherente (Edwards y Richardson, 2004; Figura 16) porque su mecanismo de reproducción se desencadena principalmente en función de los aumentos de la intensidad luminosa. Los copépodos han tenido



respuestas más variables, pero el pico estacional de algunas especies se registra ahora más temprano en el año (Edwards y Richardson, 2004). Beaugrand *et al.* (2003) y Reid *et al.* (2003) han demostrado que, en el mar del Norte, después de mediados del decenio de 1980, las fluctuaciones en la abundancia del plancton debidas al cambio climático han afectado a la supervivencia de las larvas de bacalao a causa de un desajuste entre el tamaño de la presa (copépodos calanoides) y larvas de un tamaño de más de 30 mm. El período de desove de la almeja Báltica (*Macoma balthica*) en Europa noroccidental también depende de la temperatura. Las tendencias recientes del recalentamiento han conducido a un desove precoz pero no a una floración más temprana del fitoplancton primaveral, lo que ha ocasionado un desfase temporal entre la producción de larvas y el suministro de alimento (Philippart *et al.*, 2003). Otra complicación relacionada con los mecanismos de concordancia y discordancia es que es preciso tomar en cuenta la amplitud de los picos y un posible efecto de umbral (Stenseth y Mysterud, 2002; Durant *et al.*, 2005). Durant *et al.* (2005), por ejemplo, demostraron que en el caso de la relación arenque/frailecillo la abundancia de arenques era el factor que estructuraba la concordancia entre el depredador y su presa.

Mackas, Batten y Trudel (2007) han examinado las series cronológicas de la abundancia y fenología de los copépodos basándose en datos derivados de estudios de remolque neto y del Registro Planctónico Continuo en el Pacífico oriental norte sub-Ártico a lo largo de las últimas décadas. Las dos respuestas más marcadas observadas fueron los cambios latitudinales en los centros de abundancia de muchas especies (en dirección al polo bajo condiciones térmicas templadas), y los cambios en la cronología del ciclo vital del copépodo *Neocalanus plumchrus* (tiempos adelantados en varias semanas durante los años cálidos y en los lugares más templados). Las observaciones del zooplancton y los altos índices tróficos (peces, aves) en el Pacífico septentrional mostraron pautas coherentes en estrecha correlación con las grandes fluctuaciones del clima oceánico de un año a otro y de una década a otra, como las reflejan las anomalías de la temperatura de primavera en la superficie de la capa de mezcla. Como los cambios en la cronología del desarrollo zooplanctónico no pueden ser explicados únicamente por la aceleración fisiológica, se ha formulado la hipótesis de que las cohortes presentan índices de mortalidad diferenciados (Mackas, Goldblatt y Lewis, 1998). Mackas, Batten y Trudel (2007) llegan a la conclusión de que en los ambientes fuertemente estacionales, las temperaturas anormalmente altas pueden proporcionar pistas engañosas que contribuyen al desfase temporal entre los acontecimientos del ciclo vital y de la insolación –que tiene una regularidad estacional casi fija–, la estratificación y el suministro de alimento. Hay indicios de que estos cambios cronológicos pueden ser coherentes entre sí en varias cuencas oceánicas (Figura 17; Perry *et al.*, 2004). Edwards



y Richardson (2004) también notaron que la temperatura del agua afecta al período de transición ontogénica, y que esto podría conducir a disociar los cambios que tienen lugar en el ambiente larval de los indicadores de los que se vale la población adulta.

2.6.2 Aguas continentales

Muchos lagos están respondiendo con procesos de adaptación fenológica a la precocidad del rompimiento de los hielos y a las temperaturas más cálidas. En varios de los grandes lagos de Europa, la floración primaveral de las algas ahora se adelanta aproximadamente cuatro semanas (Gerten y Adrian, 2000; Straile y Adrian, 2000). En muchos casos en que la floración primaveral del fitoplancton se ha anticipado, el zooplancton no ha respondido de forma similar, y las poblaciones están disminuyendo porque su emergencia ya no corresponde a la elevada abundancia de algas (Gerten y Adrian, 2000). Por ejemplo, en un lago del noroeste de los Estados Unidos de América la floración del fitoplancton se adelantó 19 días entre 1962 y 2002, mientras que el pico del zooplancton ha seguido un patrón más variable, con algunas especies que registran precocidad y otras que se mantienen estables (Winder y Schindler, 2004 a, b). También se ha demostrado la existencia de cambios fenológicos en el caso de algunas especies de peces silvestres y cultivadas (Ahas, 1999; Elliott, Hurley y Maberly, 2000). Puesto que

no todos los organismos responden de forma semejante, la magnitud de las respuestas fenológicas entre especies ha afectado las interacciones de la cadena trófica (Winder y Schindler, 2004a).

2.7 Invasiones de especies y enfermedades

A escala mundial, los brotes de enfermedades han aumentado a lo largo de los últimos 30 años en muchos grupos marinos, en especial los corales, equinodermos, mamíferos, moluscos y tortugas (Ward y Lafferty, 2004). Las causas de la mayor frecuencia de las enfermedades siguen siendo inciertas, aunque el aumento de la temperatura es un factor no ajeno al incremento de los trastornos patológicos que afectan a muchos grupos (Harvell *et al.*, 2002). Enfermedades no antes constatadas también han aparecido en nuevas zonas debido a cambios en la distribución de hospedantes o patógenos, muchas veces en respuesta al cambio climático (Harvell *et al.*, 1999).

La ecología de ciertos organismos patógenos humanos asociados con el ambiente acuático también se ha vinculado con los cambios en las temperaturas. *Vibrio parahaemolyticus* es un patógeno frecuente de las gastroenteritis causadas por el consumo de ostras crudas; y, pese a que este organismo tiene una distribución mundial, rara vez está presente cuando la temperatura del agua es inferior a 15 °C (ICMSF, 1996). El brote de gastroenteritis por ostras de Alaska registrado en 2004 se extendió 1 000 km más allá del límite septentrional documentado para las ostras que causan esta enfermedad debida al mencionado organismo (McLaughlin *et al.*, 2005). Se ha informado que desde 1997 la temperatura media del agua durante julio y agosto en la región involucrada aumentó en 0,21 °C al año. Esto indica que el alza de la temperatura de la superficie del mar puede determinar peligros microbianos en zonas donde éstos nunca antes se habían observado (p. ej., el brote de diarrea por *V. parahaemolyticus* en Puerto Montt [Chile] en 2004, 2005 y 2006; González-Escalona *et al.*, 2005; Fuenzalida *et al.*, 2007). *Vibrio cholerae* está en asociación simbiótica con el zooplancton, y debido a la transmisión de este patógeno a través del agua y el pescado, los acontecimientos climáticos extremos pueden conducir a la agudización de las situaciones de riesgo (Lipp *et al.*, 2002). Los fenómenos vinculados al cambio climático, como tormentas y crecidas, pueden ser responsables del transporte de patógenos como los virus (*Norovirus*, virus de la hepatitis A) desde las fuentes de aguas de desecho hasta las zonas donde crecen los crustáceos. Los bivalvos, que son organismos que se alimentan por filtración, pueden bioconcentrar los virus a niveles muy superiores a los del agua (Richards, 2001). Por lo tanto, en los programas de gestión de inocuidad del pescado es necesario tomar en consideración estos peligros al hacer evaluaciones de riesgos.

Existen también cambios latitudinales relacionados con las enfermedades en ambientes terrestres y marinos debidas a una respuesta directa del patógeno o a la respuesta de su vector. Debido al cambio climático, pueden aumentar el desarrollo y el índice de supervivencia de los patógenos y la transmisibilidad y vulnerabilidad del huésped ante la enfermedad, aunque con el calentamiento el número de individuos que componen un subconjunto de patógenos puede disminuir liberando huéspedes patógenos (Harvell *et al.*, 2002). Al respecto, se tienen escasas pruebas en los ecosistemas marinos, excepto para los mamíferos marinos, los invertebrados marinos, tales como ostras, y ciertas algas (*Zostera marina*) (aunque los mecanismos de patogénesis de estos dos últimos grupos se desconocen), y la mayor parte de las tasas de crecimiento de las bacterias marinas y hongos presentes en los ecosistemas coralíferos, y su presencia podría correlacionarse positivamente con el aumento de la temperatura (Harvell *et al.*, 1999).

Una excepción es la extensión de dos parásitos protozoarios (*Perkinsus marinus* y *Haplosporidium nelsoni*) desde el Golfo de México hasta la bahía de Delaware y más al norte, donde han causado mortalidad masiva en la ostra del Atlántico (*Crassostrea virginica*). Las temperaturas invernales, siempre inferiores a 3 °C, limitan el desarrollo

de la enfermedad de la espora multinucleada desconocida, que es causada por el patógeno protozoario *Haplosporidium nelsoni* (Hofmann *et al.*, 2001), y se espera que la propagación hacia el polo de este y otros patógenos continúe conforme estas temperaturas invernales se hagan más infrecuentes. Este ejemplo ilustra también la importancia de la información estacional al considerar los efectos del cambio climático, ya que en el presente caso es la temperatura invernal la que controla la difusión del patógeno.

Se ha comprobado que algunos fenómenos de mortalidad masiva de peces pelágicos se han debido a enfermedades, como el caso de mortalidad de sardinas en las costas australianas, causado por un virus (Gaughan, 2002); sin embargo, estos fenómenos han estado relacionados con la introducción del agente patógeno por el hombre y no con el cambio climático. Otros casos de mortalidad masiva, tales como la observada en la sardina de Marruecos (*Sardina pilchardus*) en 1997, parecen estar más relacionados con cambios ambientales abruptos. En un solo año (1991), el ámbito de distribución del parásito de la ostra *Perkinsus marinus* se extendió hacia el norte, desde la bahía de Chesapeake hasta Maine, es decir un desplazamiento de 500 km. Los censos levantados entre 1949 y 1990 mostraron que el parásito tenía una distribución estable desde el Golfo de México hasta su límite norteño en la bahía de Chesapeake. La rápida expansión ocurrida en 1991 se ha atribuido a temperaturas invernales superiores a la media más que a una introducción humana o a un cambio genético (Ford, 1996).

Marcogliese (2001) reconoció que los parásitos de agua dulce y los organismos marinos sufrirán los efectos del cambio climático directamente, pero también indirectamente a través de esos mismos efectos sobre sus huéspedes. El cambio climático puede influir asimismo en la selección de modos diferentes de transmisión y en la virulencia (Marcogliese, 2001).

Además de permitir la expansión de las zonas de distribución natural, las temperaturas más cálidas pueden facilitar el establecimiento y propagación de especies introducidas deliberada o accidentalmente (Carlton, 2000; Stachowicz *et al.*, 2002b).

Algunos autores han mencionado que, debido a influencias antropogénicas, la proliferación de algas nocivas (FAN) ha aumentado en todo el mundo (Smayda, 1990; Hallegraeff, 1993), mientras que otros han sostenido que la variabilidad del clima (además de una vigilancia y sensibilización mayores) es un factor igualmente importante (Sellner, Doucette y Kirkpatrick, 2003). Edwards *et al.* (2006) han mostrado que los florecimientos algales nocivos se ha intensificado efectivamente en algunas zonas del Atlántico nororiental, pero no de manera homogénea, limitándose a algunos tipos de hábitat específicos. Es evidente que un aumento de la proporción de dinoflagelados respecto a la de diatomeas se ha constatado en el mar del Norte meridional (Hickel, 1998) y en el Báltico (Wasmund, Nausch y Mattahaus, 1998), y se ha pronosticado en muchos modelos de cambio climático (véase la Sección 2.2.2). La dominancia de los dinoflagelados se relacionó con temperaturas invernales más suaves. Si estos cambios climáticos llegaran a persistir, el fenómeno proliferativo podría conducir a la emergencia de un nuevo régimen de sucesión fitoplanctónico (Edwards *et al.*, 2006). Aunque la actividad de los coccolitofóridos, detectada por instrumentos satelitales, no puede ser clasificada como un caso de proliferación de algas nocivas (Smyth, Tyrell y Tarrent, 2004), esta manifestación se correlaciona estrechamente con las temperaturas cálidas y la baja salinidad que se registran frente a la costa septentrional de Noruega y el mar de Barents. Por ejemplo, en el lado opuesto del Atlántico, en la región del Gran Banco de Terranova, se han observado cambios en la relación diatomeas/dinoflagelados, con una abundancia creciente de los segundos (sobre todo *Ceratium arcticum*) (Johns *et al.*, 2003). Estos cambios, registrados desde comienzos del decenio de 1990, se han vinculado en esa región con las variaciones hidroclimáticas, en especial el aumento de la estratificación y la estabilidad, que indican un progresivo refrescamiento causado probablemente por el recalentamiento climático regional.

Según registros geológicos del Atlántico y Pacífico de Canadá, entre la edad glacial tardía y el Holoceno temprano, cuando la temperatura estival de la superficie del mar era mucho más cálida (alcanzando los 58 °C), hubo un período de alta producción sostenida de microalgas causantes de marea roja (Mudie, Rochon y Levac, 2002). Este fenómeno indujo a los autores a manifestar que el recalentamiento mundial ha tenido mucho que ver con el aumento de la frecuencia de las mareas rojas y otros tipos de proliferación de algas nocivas a lo largo de la historia (véase también Dale, 2001).

Una última repercusión, aún por evaluar adecuadamente, consiste en el agotamiento de la capa de ozono a consecuencia del aumento de la concentración de CO₂ (Austin, Butchart y Shine, 1992). Este proceso tendrá como resultado la intensificación de la radiación ultravioleta en la superficie del océano, que afectará probablemente a los procesos biológicos. La respuesta de una determinada especie a la exposición a rayos UV podría depender de la presencia de otras especies (Harley *et al.*, 2006). Por ejemplo, se comprobó que el fitoplancton marino estaba protegido contra los daños causados por los rayos UVB al ser co-cultivado con virus marinos (Jacquet y Bratbak, 2003).

2.8 Repercusiones en la red trófica, desde el plancton hasta los peces

Los cambios en la composición y abundancia, que son impulsados por las alteraciones climáticas, modificarán la diversidad de las especies y acarrearán consecuencias en las funciones del ecosistema, por ejemplo en cuanto a productividad (Duffy, 2003) y resistencia a invasiones de especies (Stachowicz *et al.*, 2002a; Duffy, 2003). La comprensión de la relación entre diversidad de especies y el funcionamiento de los ecosistemas constituye un vacío en la investigación sobre ecología marina que está aún abierto a investigaciones en el ámbito del cambio climático.

Es probable que el cambio climático afecte tanto directa como indirectamente a los ecosistemas y a las especies que éste alberga por conducto de los procesos relacionados con las redes tróficas, las cuales mantienen, al mismo tiempo, relaciones recíprocas diferenciadas (Figura 7). La predominancia de procesos directos o indirectos será variable según los sistemas y dependerá a menudo de si la estructuración de estos últimos procede desde arriba, desde abajo o si es central (Cury *et al.*, 2000). Por ejemplo, el aumento en la frecuencia de las proliferaciones del zooplancton gelatinoso ha sido observada (en el mar de Bering: Brodeur, Sugisaki y Hunt, 2002) y aumentará, según se pronostica, a causa del recalentamiento mundial (en el mar del Norte: Attrill, Wright y Edwards, 2007). En el Pacífico tropical, parece que predominan los efectos directos en las especies de peces pelágicos dominantes, mientras que los procesos relacionados con la red trófica son más significativos en la parte occidental del golfo de Alaska, y lo son aún más en el mar de Barents (Ciannelli *et al.*, 2005; Ottersen *et al.*, 2008).

Frank, Petrie y Shackell (2007) mostraron que la modalidad del forzamiento trófico está estrechamente relacionada con la riqueza de especies y la temperatura. Los autores sugieren que las áreas muy frías y pobres en especies pueden fácilmente sucumbir ante un control descendente y recuperarse lentamente (o no recuperarse jamás); y que las áreas más templadas con mayor número de especies pueden oscilar entre un control descendente o ascendente según los índices de explotación y posiblemente también los cambios de régimen térmico.

La conectividad de la red trófica también desempeña un papel. Mientras que en las redes tróficas tradicionales un cierto número de depredadores se alimenta de presas diferentes de forma equilibrada, hay muchos casos en los que una especie alimento es la que domina, ejerciendo por consiguiente una función de control significativa: el capelán (*Mallotus villosus*) en los mares boreales del Atlántico septentrional, el carbonero (*Theragra chalcogramma*) en el mar de Bering, las pequeñas especies pelágicas en las regiones de surgencia (Cury *et al.*, 2000), etc. Aun cuando existen varias especies de peces que pueden servir de presas, existe a menudo un invertebrado que domina el siguiente nivel en sentido descendente (a menudo un copépodo, Ware y

Thomson, 1992) cuyas fluctuaciones decádicas con frecuencia están acompañadas con un dinamismo sincrónico que distingue las principales etapas larvales y juveniles del pez (p. ej., Beaugrand *et al.*, 2003; Beaugrand, 2004; Heath y Lough, 2007). Sin embargo, por lo general la presencia de una única especie que juega el papel de canal energético ascendente primario hacia los niveles tróficos superiores hace sumamente difícil relacionar la dinámica de un determinado nivel trófico superior con un determinado nivel inferior (Pimm, Lawton y Cohen, 1991; Rice, 1995). Es por esto que la capacidad predictiva de los modelos de análisis de los impactos del cambio climático en las redes tróficas es escasa.

El siguiente ejemplo describe esta compleja situación. La dinámica del bacalao del mar de Barents (*Gadus morhua*), del capelán (*Mallotus villosus*) y del arenque (*Clupea harengus*) manifiesta fuertes interacciones y está influenciada por las diferentes modalidades de la cosecha. La cosecha y la depredación del capelán por el arenque pueden ocasionar el colapso de la población, mientras que la depredación por el bacalao (*Gadus morhua*) retarda la recuperación del capelán tras un episodio de colapso (Hjermann, Stenseth y Ottersen, 2004a). La temperatura y el índice de oscilación del Atlántico norte se correlacionan positivamente con el crecimiento del bacalao hasta la edad de cuatro años, pero esta correlación no se produce en el caso de los peces más viejos, los cuales se ven más afectados por la proporción entre bacalao y capelán (Hjermann, Stenseth y Ottersen, 2004b). El enlace entre pares de especies también puede variar de un área a otra. Por ejemplo, la estructura del desfase cronológico en el sistema del mar de Barents indica que el efecto indirecto del arenque en el bacalao es más importante que el efecto directo (Hjermann, Stenseth y Ottersen, 2004a, b), mientras que en el mar Báltico ocurre lo contrario (Köster *et al.*, 2001). Por lo tanto, el efecto que el arenque ejerce en el bacalao depende del tamaño de la población de bacalao en el mar de Barents, pero en el mar Báltico este efecto es menor (Hjermann *et al.*, 2007). Esta es la manera en que funciona probablemente el desfase cronológico entre los efectos del clima y los efectos biológicos; y la sola posición trófica no constituye un indicador preciso acerca de si las poblaciones responden al clima directamente o con retraso (p. ej., Ottersen, Stenseth y Hurrell, 2004; Post, 2004).

Lo más común es observar cambios sincronizados en varios niveles tróficos, sin una clara relación causal. En el mar del Norte, se han constatado modificaciones en la composición y productividad de las comunidades planctónicas y bentónicas desde 1955 (Clark y Frid, 2001) que desde mediados del decenio de 1980 pueden haber reducido la supervivencia de los bacalao jóvenes (Beaugrand *et al.*, 2003). Se han detectado profundas variaciones en la biodiversidad pelágica (Beaugrand *et al.*, 2002) y en la composición de las comunidades ícticas (Genner *et al.*, 2004; Perry *et al.*, 2005). Los cambios en la estacionalidad o en la repetición de los fenómenos hidrográficos o en los períodos productivos podrían verse afectados por los enlaces tróficos (Stenseth *et al.*, 2002, 2003; Platt, Fuentes-Yaco y Frank, 2003; Llope *et al.*, 2006). Las temperaturas elevadas han determinado un aumento de mortalidad de los huevos y larvas de la solla roja (*Pseudopleuronectes americanus*) (Keller y Klein-MacPhee, 2000) y conducido a migraciones de desove más tardías (Sims *et al.*, 2004).

Un incremento de 2 °C de la temperatura de la superficie del mar podría dar lugar a la desaparición de los bivalvos de la Antártida y patelas del océano Austral (Peck, Webb y Bailey, 2004). De acuerdo con los pronósticos sobre calentamiento del agua de superficie y el aumento de la producción primaria en las medias y altas latitudes, las poblaciones de atún podrían extenderse por las regiones que hoy son templadas (Loukos *et al.*, 2003).

El efecto directo de la temperatura en el índice de reclutamiento del bacalao en distintas áreas del Atlántico septentrional ha sido reinterpretado por Sundby (2000), quien indica que, además de dicho efecto directo, es probable que la temperatura haya representado un factor supletorio en la abundancia del zooplancton, la cual a su vez tiene

un efecto considerable en la supervivencia de las larvas. El autor sostiene que, al menos en el mar de Barents, los cambios que afectan al zooplancton se deben a la advección de aguas templadas y ricas en zooplancton del Atlántico provenientes del mar de Noruega. En el propio mar de Noruega, la temperatura por sí podría ser el factor que controla directamente el crecimiento de los copépodos, en especial *Calanus finmarchicus*. Sundby (2000) sugiere además que la abundancia de la población zooplanctónica depende asimismo de la abundancia de su presa, el fitoplancton. En último término, según las observaciones de Planque y Frédou (1999, Figura 9), la ventana térmica óptima para la abundancia del bacalao podría estar dada por la combinación y la interacción de un efecto térmico directo en esta especie, pero también por los efectos indirectos de la temperatura en la red trófica, los cuales están modulados por los procesos de advección. En virtud de estos procesos, y dependiendo de la dirección del flujo, la abundancia de bacalao estará relacionada con las temperaturas frías o templadas. Las conclusiones de Sundby valdrán seguramente para estas especies en el mar del Norte pero igualmente para otros lugares, porque los copépodos son la presa principal de los pequeños peces pelágicos tales como el arenque y el capelán.

2.9 Cambios de régimen y otros acontecimientos ecosistémicos extremos

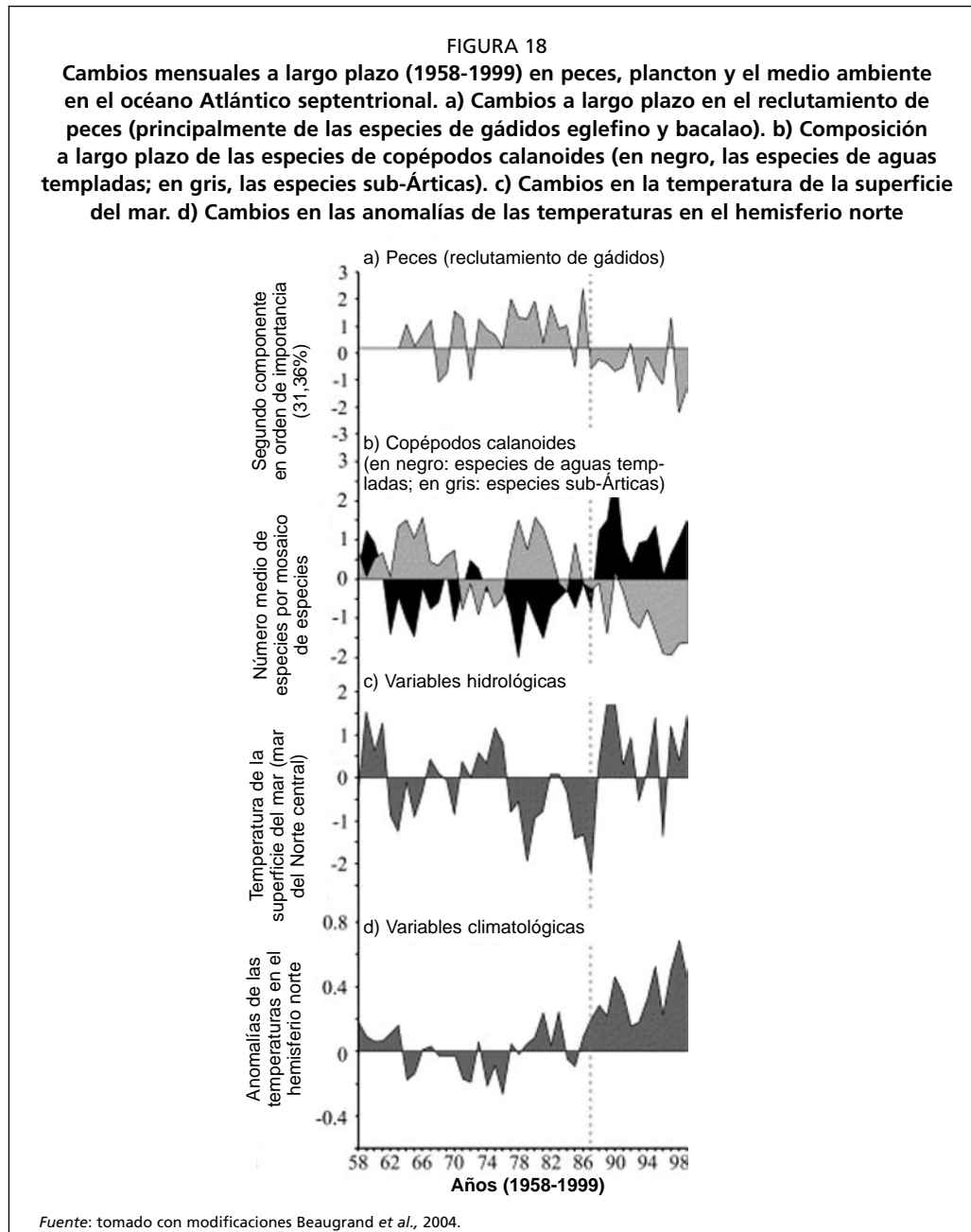
El concepto de «cambios de régimen» es un mecanismo recientemente adoptado, según el cual la interacción entre variabilidad climática y cambio climático afecta a la dinámica del ecosistema. El término se suele definir comúnmente con arreglo a la noción de estados estables múltiples de un sistema físico o ecológico, una transición rápida de un estado semipermanente a otro y un enlace con el proceso de forzamiento climático (deYoung *et al.*, 2004). Aunque los cambios de régimen han sido observados en los ecosistemas terrestres, de aguas dulces y marinos (Scheffer *et al.*, 2001a; deYoung *et al.*, 2004), su dinámica subyacente sigue siendo una cuestión polémica (deYoung *et al.*, 2008). En un contexto ecológico, los cambios de régimen se propagan a través de varios niveles tróficos (Cury y Shannon, 2004; Scheffer *et al.*, 2001; Carpenter, 2003), y son por consiguiente procesos en los que un único mecanismo de forzamiento involucra la totalidad del ecosistema.

Aunque en los ecosistemas marinos los cambios de régimen se atribuyen por lo general al forzamiento climático, estos cambios también pueden ser producidos por la sobrepesca, la contaminación o una combinación de ambas (Hare y Mantua, 2000; Jackson *et al.*, 2001; Beaugrand *et al.*, 2002; Daskalov, 2002; Frank *et al.*, 2005; Greene y Pershing, 2007). Del mismo modo, se ha observado que en los lagos los cambios de régimen son tanto impulsados por el cambio climático (Carpenter, 2003; Smol *et al.*, 2005) así como mediados por la sobrepesca y la contaminación (Carpenter, 2003; Scheffer y Van Ness, 2004). Al comparar la dinámica de los cambios de régimen en los ambientes dulceacuícola y marino, Scheffer y Van Ness (2004) concluyeron que en ambos sistemas pueden existir mecanismos similares de atracción (que determinan por lo tanto cambios de régimen ocasionales). Los autores plantearon no obstante que los cambios de régimen bentónicos pueden tener lugar fácilmente pero ser de carácter relativamente local, mientras que los cambios de régimen en océano abierto podrían no surgir tan fácilmente pero ser mayores en magnitud y escala.

Una consideración importante puesta de manifiesto por Hsieh *et al.* (2005) es que las respuestas biológicas al cambio climático pueden ser no lineales (p. ej., un cambio de régimen) pese a que los cambios abióticos subyacentes sean lineales y estocásticos. La capacidad amplificadora de los ecosistemas de las señales climáticas (Taylor, Allen y Clark, 2002) indica que los cambios graduales futuros del clima pueden provocar respuestas biológicas repentinas y quizá impredecibles cuando los ecosistemas pasan de un estado a otro (véase p. ej., Smol *et al.*, 2005). Por esta razón, los cambios biológicos pueden seguir patrones que van de las relaciones suaves y casi lineales entre el factor de forzamiento y la respuesta biológica (Collie, Richardson y Steele, 2004) a una relación abrupta no lineal

entre el factor de forzamiento y las variables de la respuesta (Scheffer *et al.*, 2001a; Collie, Richardson y Steele, 2004). Estos patrones pueden comprender relaciones discontinuas que exhiben una respuesta de histéresis, en la que la variable de forzamiento sobrepasa un umbral crítico produciendo, en la variable de respuesta, situaciones de inestabilidad durante su tránsito de un estado de equilibrio al siguiente (Scheffer *et al.*, 2001; Collie, Richardson y Steele, 2004). La diferencia entre las tres respuestas surge cuando la variable de forzamiento se invierte. Para que un régimen discontinuo se invierta, la variable de forzamiento debe superar un segundo umbral crítico, que es más bajo que el primero, y que por lo tanto exhibe histéresis (Collie, Richardson y Steele, 2004).

Los cambios de régimen en gran escala son particularmente significativos si se consideran sus consecuencias potenciales. A escala de las cuencas, los cambios de régimen se han constatado en el Atlántico septentrional a comienzos del decenio de 1960 y finales del de 1980 (Reid, Borges y Svendsen, 2001; Beaugrand, 2004; Genner *et al.*, 2004; Clark y Frid, 2001, Figura 18), y en el Pacífico septentrional en 1925, 1945, 1977, 1989 y 1998 (Hare y Mantua, 2000; Benson y Trites, 2002; King, 2005).



Durante la fase negativa de la oscilación del Atlántico norte del decenio de 1960, el Atlántico nororiental estuvo caracterizado por una alta biomasa de copépodos calanoides de tamaño promedio alto y por una gran abundancia de *Calanus finmarchicus* (Beaugrand *et al.*, 2003). En la estructura de la comunidad planctónica del Atlántico septentrional se observaron modificaciones que coincidieron con un cambio de régimen climático que ocurrió a mediados del decenio de 1980, junto a la disminución del tamaño medio de los copépodos calanoides, el retraso en la aparición de *Calanus* de primavera a finales de verano, la disminución de la biomasa total de copépodos y una disminución en la abundancia de eufáusidos (Beaugrand *et al.*, 2003, Figura 18). La modificación de la biomasa planctónica coincidió con cambios en el clima, en el reclutamiento de especies de peces comerciales y en la biomasa desovante de la población (SSB; Parsons y Lear, 2001). La señal de cambio en la biomasa zooplanctónica ocurrió dos años más tarde que la señal evidenciada por el índice de oscilación del Atlántico norte (Lees *et al.*, 2006). Durante el decenio de 1960 (fase negativa de la oscilación del Atlántico norte), el reclutamiento de bacalao (*Gadus morhua*), eglefino (*Melanogrammus aeglefinus*), plegonero *Merlangius merlangus*) y carbonero (*Pollachius virens*) en el mar del Norte tocó niveles sin precedentes durante el período denominado «explosión de los recursos de gádidos» (Hislop, 1996; Beaugrand *et al.*, 2003). No se observaron clases anuales abundantes de carbonero, bacalao o plegonero después de finales del decenio de 1980 al poco tiempo de concluir el cambio de régimen climático en el Atlántico septentrional y las modificaciones en la biomasa planctónica. Esto se puede atribuir a una alta mortalidad de peces, al cambio climático o a ambos fenómenos (Beaugrand *et al.*, 2003; Lees *et al.*, 2006). El reclutamiento del bacalao, carbonero y plegonero en el mar del Norte pareció variar de un reclutamiento medio relativamente alto a un reclutamiento medio relativamente bajo en torno a finales del decenio de 1980, manifestando una correlación positiva con la biomasa zooplanctónica, con retrasos de dos, cinco y seis años, respectivamente (Lees *et al.*, 2006). La biomasa desovante de bacalao varió de un nivel alto a un nivel bajo y casi estable a finales de ese decenio. La biomasa de la población reproductora del carbonero y plegonero ha evidenciado un nivel bajo y casi estable desde finales del decenio de 1970 y mediados del de 1980, respectivamente (Lees *et al.*, 2006).

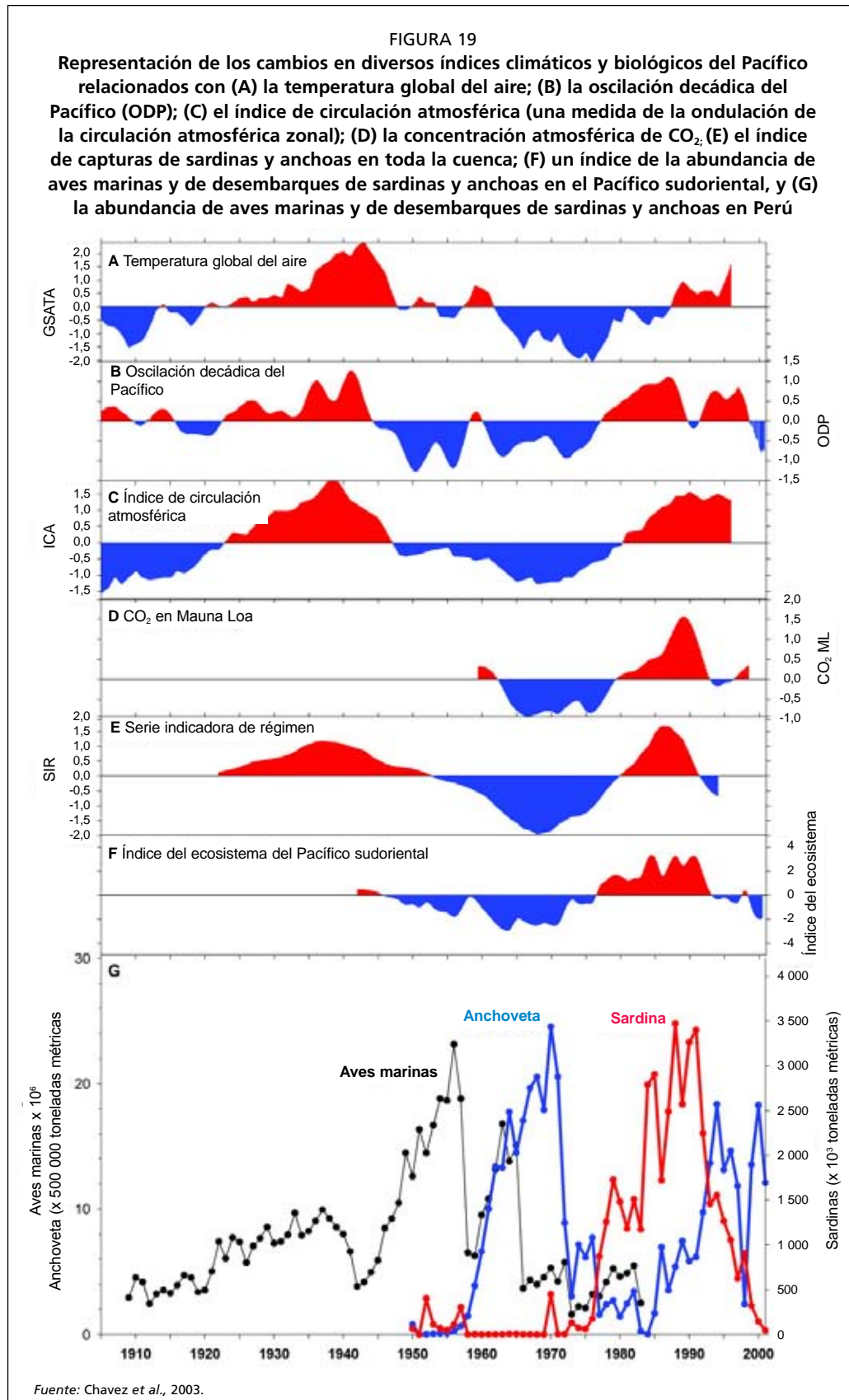
Los cambios de régimen climático, evidentes en la oscilación decádica del Pacífico en 1977, 1989 y 1998, han estado asociados cada vez con modificaciones ecológicas en gran escala (Hare y Mantua, 2000; Benson y Trites, 2002; King, 2005). La biomasa zooplanctónica total del Pacífico septentrional registró su fase más persistente y positiva entre 1965 y 1970 y alcanzó su valor más positivo en 1968, para disminuir y alcanzar, en 1989, su punto más bajo jamás registrado, manteniéndose en valores constantemente bajos entre 1990 y 1997 (Lees *et al.*, 2006). Esta variación coincidió con el cambio de régimen climático postulado para 1989. No obstante, no se observaron variaciones en la biomasa planctónica del Pacífico septentrional tras el cambio de régimen climático de 1977. En concomitancia con el desplazamiento climático, el reclutamiento del fletán de Groenlandia (*Reinhardtius hippoglossoides*) en el mar de Bering pasó de una fase alta a una baja entre 1978 y 1982. En el golfo de Alaska, el reclutamiento del bacalao negro (*Anoplopoma fimbria*) pasó de una fase alta a una baja entre 1980 y 1981. El reclutamiento del fletán del Pacífico (*Hippoglossus stenolepis*), del chancharro alacrán (*Sebastobus alascanus*) y del halibut del Pacífico (*Atheresthes stomias*) pasó de regímenes bajos a regímenes altos a finales del decenio de 1970. Clark y Hare (2002) incorporaron este concepto de regímenes de productividad oceánica alta y baja en un modelo general del reclutamiento poblacional para el halibut del Pacífico porque habían encontrado que el reclutamiento era más alto durante los regímenes cálidos. Los autores concluyeron que para un mismo tamaño de población reproductora el reclutamiento del halibut del Pacífico podía duplicarse en función del régimen de productividad. Más recientemente, se ha informado de algunas variaciones ecológicas en gran escala que han tenido

lugar en coincidencia con el cambio de régimen climático en el Pacífico septentrional postulado para 1998. King (2005) informó de una merma de productividad en toda la cadena trófica central del Pacífico septentrional, de un aumento de productividad en el sistema de la corriente de California y de un aumento de productividad en algunas áreas del golfo de Alaska y el oeste del Pacífico septentrional, pero de una aparente ausencia de respuesta en el mar de Bering y las islas Aleutianas.

Chávez *et al.* (2003) observaron que varias características de todo el océano Pacífico septentrional y meridional habían cambiado a comienzos del decenio de 1950 y finales del de 1970 (Figura 19). En las regiones subtropicales de ambas cuencas oceánicas, las condiciones climatológicas más templadas fueron favorables para las poblaciones de sardinas, mientras que condiciones más frescas lo fueron para la anchoa, aunque varios otros cambios en el suministro de nutrientes, en las gallinetas, el salmón, el atún y en las aves marinas también concordaron con las condiciones climatológicas cálidas y frescas. Chávez *et al.* (2003) atribuyeron estos cambios a grandes alteraciones espaciales y temporales en la pendiente del nivel del mar, y por consiguiente a la proximidad de la termoclina a la superficie del mar y el ulterior suministro de nutrientes en las capas oceánicas superiores.

Varios autores han constatado una aparente sincronía de fluctuaciones (o regímenes) que derivaría de la abundancia de poblaciones ícticas provenientes de diversas partes de la misma cuenca oceánica o que incluso cruzan los océanos. Este fenómeno ha sido muy claro en el caso de las pequeñas especies pelágicas (véase p. ej. Kawasaki, 1992), aunque no exclusivamente (véase p. ej. Bakun, 1996; Klyashtorin, 2001; Chávez *et al.*, 2003; Weijerman, Lindeboom y Zuur, 2005). Cabría concluir que los cambios a escala planetaria de las pautas de circulación atmosférica pueden producir fluctuaciones aparentemente relacionadas en poblaciones de peces muy distantes unas de otras. Sin embargo, este tipo de análisis ha sido objeto de críticas que se han apoyado en consideraciones estadísticas y mecanicistas (Fréon, Mullon y Voisin, 2003; Stenseth *et al.*, 2003). Overland *et al.* (2008) llegaron a la conclusión de que si bien las variables climáticas pueden presentar fuertes teleconexiones dentro de cada una de las cuencas oceánicas, los efectos de las teleconexiones entre cuencas y el potencial sincronismo climático-biológico a lo largo de varias décadas son por lo general mucho más débiles. Overland *et al.* (2008) también notaron que las anomalías climáticas mensuales, los acontecimientos del tipo El Niño más la variabilidad de «ruido rojo» pluridécada de banda ancha tenían efectos acumulativos. Cuando esta variabilidad se transfiere a los sistemas biológicos, los desfases cronológicos y efectos de retroalimentación, además de algunos comportamientos no lineales, hacen que dichos sistemas respondan a los cambios climáticos presentando una combinación de fluctuaciones lentas, de tendencias prolongadas y de cambios escalonados, difícilmente predecibles, pero inevitables. A estas influencias de los sistemas naturales sobre el posible sincronismo en gran escala de las poblaciones ícticas se añaden las influencias humanas, por ejemplo el desplazamiento de las embarcaciones de pesca y de experiencia desde California a América del Sur ocurrido tras el colapso de la pesquería californiana de la sardina en los decenios de 1940 y de 1950 (Ueber y MacCall, 1992), y las tendencias comunes en las capturas de arenque entre Islandia y Columbia Británica (Canadá) resultantes del desarrollo de tecnologías y mercados similares (Hamilton, Otterstand y Ogmundardottir, 2006).

De Young *et al.* (2008) presentan un marco conceptual que permite detectar, predecir y manejar los cambios de régimen que tienen lugar en el océano, y concluyen que la capacidad de adaptación o de gestión de estos cambios depende de la singularidad de los cambios y de nuestra habilidad para entender sus causas y las vinculaciones entre los componentes del ecosistema y de nuestra capacidad de observación. Como la probabilidad de aparición de cambios de régimen producidos por el clima es mayor cuando la resiliencia del ecosistema (entendida como la perturbación que éste puede tolerar antes de mudar su situación, véase p. ej. Scheffer *et al.*, 2001a; Cropp y Gabrica,



2002; Folke *et al.*, 2004), se reduce por efecto de la acción del ser humano, por ejemplo cuando algunas especies, grupos de edad o niveles tróficos que desempeñan funciones esenciales son eliminados, o cuando se introducen desechos o sustancias contaminantes

(Folke *et al.*, 2004), surge la interrogante de si la capacidad de recuperación del ecosistema permitirá a éste soportar los cambios climáticos antropogénicos que puedan surgir en el futuro.

En el contexto del cambio climático mundial es interesante considerar un conjunto separado de acontecimientos biológicos no lineales que pueden ser generados no por influencias climáticas lineales sino por un clima más tormentoso. Este asunto ha sido planteado en dos estudios. Trenberth *et al.* (2007) informaron recientemente de que las tormentas tropicales en el Atlántico septentrional y el Pacífico septentrional oeste habían aumentado en un 75 por ciento, y Saunders y Lea (2008) demostraron que existía una elevada correlación entre la temperatura en la superficie del mar y la frecuencia e intensidad de los huracanes en el océano Atlántico. El aumento de las tormentas puede alterar los regímenes de perturbación en los ecosistemas costeros y determinar cambios en la diversidad, y por consiguiente en el funcionamiento del ecosistema. Las marismas, manglares y arrecifes de coral son particularmente vulnerables a estos efectos (véase p. ej. Bertness y Ewanchuk, 2002; Hughes *et al.*, 2003). Es bien sabido además que los arrecifes de coral son susceptibles al agua dulce y a los efectos de turbidez y sedimentación, que varían según los patrones climáticos costeros. Se ha informado ya de numerosas comunidades coralíferas que han sido exterminadas o dañadas simplemente a causa de fenómenos pluviales extremos (véase p. ej. Alongi y McKinnon, 2005; Fabricius, 2005).

3. HIPÓTESIS SOBRE LAS REPERCUSIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN PESQUERA Y EN LOS ECOSISTEMAS

3.1 Repercusiones generales

El cambio climático supone varios factores vinculados con el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos factores, que se enumeran detalladamente en la Sección 1 de este informe, incluyen el aumento de la temperatura y de la acidificación de los océanos, la subida del nivel del mar y factores afines tales como cambios en el comportamiento de los vientos, en la fuerza de las tormentas, en patrones de precipitación, etc. A éstos se agregan factores de estrés no climáticos que afectan a los ambientes marinos, tales como las actividades de captura, la contaminación, la introducción de especies no nativas, las modificaciones de hábitats y de zonas costeras y los cambios en el agregado de nutrientes y la escorrentía, cuyas repercusiones son variables en el espacio (Halpern *et al.*, 2008). Los factores de estrés no climáticos de los sistemas de aguas dulces incluyen la sobreexplotación, la presencia de estructuras tales como los embalses que obstruyen el paso de los flujos hídricos, las modificaciones del hábitat, la introducción de especies no nativas, la contaminación y el agregado de nutrientes (Schindler, 2001). La interacción de estos fenómenos dificulta la formulación de conclusiones generales acerca del impacto de cambio climático global en los sistemas marinos y acuáticos, pero no impide hacer predicciones más finas para las zonas locales, siempre que se identifiquen correctamente los factores mundiales y regionales de estrés en su conjunto. Por ejemplo, aunque el recalentamiento de los océanos es generalizado, el incremento de las temperaturas no se produce con la misma intensidad en todos los lugares, y en cambio algunas zonas se están refrescando (Sección 1.1). Del mismo modo, la salinidad del océano Mundial va en disminución, pero con amplias variaciones regionales (Sección 1.2).

Sin embargo, las repercusiones generales sobre los sistemas acuáticos y marinos resultantes de los cambios en gran escala relacionados con la temperatura, los vientos y la acidificación pueden pronosticarse, y en algunos casos con un alto grado de confianza. Estas repercusiones ocurrirán en diversas escalas temporales, que van desde las repercusiones rápidas (unos pocos años) hasta las lentas (varias décadas) y por lo común encajan con cambios de diversas categorías: los ligados a los patrones de distribución y abundancia, a la fenología (cronología), y a la composición, estructura y

dinámica de las comunidades de especies, incluida su productividad (Hennessy *et al.*, 2007).

3.1.1 Escalas temporales rápidas

Se estima con un alto nivel de confianza que el incremento de las temperaturas tendrá efectos negativos en la fisiología de los peces porque el aporte de oxígeno a los tejidos disminuye cuando la temperatura aumenta. Más concretamente, a determinadas temperaturas, un sistema circulatorio evolucionado será incapaz de suministrar oxígeno suficiente para satisfacer las necesidades metabólicas de los tejidos (Pörtner y Knust, 2007). Este proceso representa el fundamento fisiológico de los cambios observados y previstos en la distribución y abundancia (reclutamiento), pudiendo ser más significativo para las especies de altas latitudes y polares, muchas de las cuales tienen una baja tolerancia a los cambios de temperatura (especies estenotérmicas). En no pocas especies de peces polares el número de eritrocitos es reducido, y por lo tanto la eficacia de su mecanismo de transporte de oxígeno es menor cuando por efecto de la temperatura la demanda metabólica aumenta (Roessig *et al.*, 2004). Es probable que este factor de restricción fisiológica limite considerablemente la producción de acuicultura. A corto plazo, las altas temperaturas pueden producir índices de conversión alimentaria y de crecimiento más elevados, pero con el continuo aumento de las temperaturas es probable que la productividad de las especies cultivadas disminuya, ya que son incapaces de desplazarse (nivel de confianza mediano). Se espera que la localización óptima para las especies de acuicultura se desplace hacia los lugares más cercanos a los polos (Stenevik y Sundby, 2007).

Los factores que limitan la fisiología se traducirán en cambios en la distribución tanto de las especies de aguas dulces como de las marinas y causarán probablemente variaciones en su abundancia, porque los procesos de reclutamiento están bajo la influencia de las alteraciones de la temperatura y patrones de circulación (Sección 2.5). Los cambios más acentuados y rápidos afectarán a las poblaciones que se localizan en los bordes de su ámbito de distribución, de tal modo que las especies que están tanto en los límites de las áreas ecuatoriales como polares se desplazarán hacia los polos (nivel de confianza alto). Este tipo de respuesta será más rápido en el caso de las especies pelágicas muy móviles (Harley *et al.*, 2006), como ya ha quedado demostrado por el comportamiento del atún en el Pacífico tropical en respuesta a la variabilidad del fenómeno de oscilación meridional El Niño (Lehodey *et al.*, 1997), del zooplancton y de los peces pelágicos en el Pacífico nororiental (Ware y McFarlane, 1995; McFarlane y Beamish, 2002; Mackas, Batten y Trudel, 2007), de los pequeños pelágicos en el Canal de la Mancha (Hawkins, Southward y Genner, 2003) y del arenque de Noruega en el Atlántico nororiental (Sissener y Bjørndal, 2005). Se ha observado que las especies menos móviles, a menudo demersales, se desplazan también hacia las zonas polares (Perry *et al.*, 2005; Drinkwater, 2006) o a zonas de mayor profundidad y a los centros de surgencia fríos (Clark, 2006).

En concomitancia con el cambio climático, se esperan modificaciones en la cronología de los acontecimientos del ciclo biológico (fenología, Sección 2.6) (nivel de confianza alto). Las especies de vida corta y de tasa de rotación rápida, por ejemplo el plancton, el calamar y los pequeños peces pelágicos, son las que con mayor probabilidad experimentarán estos cambios. Éstos se traducirán, para algunas, en una proliferación planctónica primaveral anticipada (Mackas, Goldblatt y Lewis, 1998; Edwards y Richardson, 2004), pero no para otras (Greve *et al.*, 2005; Hays, Richardson y Robinson, 2005), y también en variaciones de composición ya que los tiempos de desarrollo de los componentes de las comunidades marinas se habrán alterando. En consecuencia, habrá desfases entre los ciclos de vida tempranos de los peces respecto a sus presas, y ello acarreará fallos en el reclutamiento y un declive en la abundancia (véase p. ej. Platt, Fuentes-Yaco y Frank, 2003; Sección 2.1.3).

3.1.2 Escalas temporales intermedias

A escalas temporales intermedias de unos años a una década, los factores de estrés fisiológicos inducidos por la temperatura y los cambios fenológicos repercutirán en la eficiencia de reclutamiento y por consiguiente en los índices de abundancia de muchas poblaciones marinas y acuáticas (nivel de confianza alto). Las primeras especies en sufrir repercusiones serán probablemente una vez más las de vida más corta y tasas de rotación más rápidas, porque la biomasa de las especies longevas tiende a ser menos dependiente del reclutamiento anual. Estas repercusiones se evidenciarán seguramente con más agudeza en los extremos del rango de distribución de las especies y se podrán manifestar en forma de cambios de distribución de los peces (es decir, pérdidas en las poblaciones situadas más al sur). Los cambios en la abundancia alterarán la composición de las comunidades marinas y acuáticas y tendrán posibles consecuencias en la estructura y productividad de estos ecosistemas marinos (Worm y Duffy, 2003), en particular si son afectadas especies clave o de alto impacto (Harley *et al.*, 2006). Como estos son procesos que implican varias incógnitas, la predicción de impactos y direcciones respecto a un caso específico solo se puede hacer con un bajo nivel de confianza. Sin embargo, la predicción de impactos netos en la comunidad, tales como los impactos en la biomasa total o en la productividad, puede hacerse con un nivel de confianza intermedio, debido a las dinámicas de compensación que actúan entre los miembros de los varios grupos funcionales que componen la comunidad (Mackas, Thompson y Galbraith, 2001; Jennings y Brander, 2008).

El incremento de la estratificación vertical se ha pronosticado para muchas áreas marinas (véase p. ej. Houghton, 2001) y lagos (Ficke, Myrick y Hansen, 2007), y se espera que se traduzca en un mezclamiento vertical debilitado y por lo tanto en un menor aporte de nutrientes en las capas fóticas productivas, y en una productividad mermada (nivel de confianza intermedio). Además, se ha predicho que el aumento de la estratificación producirá alteraciones en el equilibrio del reciclado de los nutrientes entre las zonas pelágicas y bentónicas, y que favorecerá las rutas y peces pelágicos en detrimento del bentos (Frank, Perry y Drinkwater, 1990). Esto ocasionará cambios en la composición de las especies (p. ej. en el Báltico, Mackenzie *et al.*, 2007) y afectará a la cronología de los procesos del ciclo biológico (p. ej. en el Pacífico, Mackas, Batten y Trudel, 2007, y en el Atlántico, Greve *et al.*, 2005). Se dispone de pruebas acerca del aumento de la estratificación vertical respecto al océano Pacífico septentrional (Freeland *et al.*, 1997) y el Atlántico septentrional (Curry y Mauritzen, 2005; véase también la Sección 1.2); sus repercusiones en los niveles tróficos inferiores en el Pacífico noroccidental (Chiba *et al.*, 2004) y en la productividad íctica en los lagos de África oriental (O'Reilly *et al.*, 2003) también ha quedado demostrada.

3.1.3 Escalas temporales largas

Las repercusiones pronosticadas en los sistemas marinos a escalas temporales largas (decádicas) dependen de los cambios pronosticados de producción primaria en los océanos y de su transferencia a niveles tróficos más elevados. A este respecto los niveles de confianza son aún bajos (Brander, 2007) pero cada vez más prometedores (Jennings *et al.*, 2008; Cheung *et al.*, 2008). En la Sección 2.2 se describen varios estudios en que se han propuesto modelos de respuestas globales de producción oceánica primaria al cambio climático. Hay diferencias significativas entre los modelos. Gracias a las predicciones regionales el nivel de confianza ha aumentado porque los procesos específicos involucrados se conocen mejor, como por ejemplo en el caso del mar Árabe (Goes *et al.*, 2005). La producción primaria puede aumentar en el futuro en algunas regiones de latitudes altas debido al calentamiento y reducción de la cubierta de hielo, pero disminuir en las regiones de latitudes bajas a causa de la debilitación de la mezcla vertical de las aguas y el reabastecimiento de nutrientes (Sarmiento *et al.*, 2004), los cambios en la circulación y las repercusiones humanas directas (Cruz *et al.*,

2007). El resultado de estos procesos es que la producción primaria puede aumentar en algunas zonas pero disminuir en otras, con un impacto global neto desconocido (Brander, 2007).

Los modelos y los estudios paleo-oceanográficos indican que la biomasa planctónica disminuirá en un 50 por ciento en el Atlántico septentrional durante los períodos en que la circulación meridional de convección es débil (Schmittner, 2005). En cambio, los modelos biológicos y físicos acoplados indican aumentos mundiales de la producción marina primaria neta de 0,7 a 8,1 por ciento pero con grandes diferencias entre las regiones (Sarmiento *et al.*, 2004). La mayor parte de los estudios de simulación concluyen, sin embargo, que en general la producción marina primaria neta disminuirá a causa del cambio climático, aunque con grandes variaciones regionales. Las observaciones empíricas de los cambios en la producción primaria neta a lo largo de las últimas décadas han mostrado en realidad un decremento, pero también con una gran variabilidad regional (Gregg *et al.*, 2003).

Otros estudios de simulación han evidenciado que los cambios en la composición del fitoplancton darán lugar probablemente a organismos más pequeños (Bopp *et al.*, 2005) y ocurrirán en consonancia con las variaciones estacionales (Hashioka y Yamanaka, 2007). Los cambios en la producción regional y en la composición de las especies repercutirán en todos los niveles tróficos, incluidos los mamíferos marinos, en especial aquellos cuya distribución, ya restringida, tiene pocas oportunidades de ampliarse (Learmonth *et al.*, 2006).

Últimamente Jennings *et al.* (2008) propusieron un nuevo enfoque para estimar los impactos del cambio climático en la producción mundial de pescado en función de las propiedades del ecosistema. Los autores observaron que en los ecosistemas marinos existen relaciones notablemente constantes y simples entre el tamaño corporal y la adquisición y transferencia de energía, y señalaron que esta aproximación podía servir para evaluar el papel del cambio de la temperatura del clima y la producción primaria en los índices de producción de niveles tróficos superiores y para establecer una línea de referencia para la evaluación de las repercusiones en la pesca (Jennings y Blanchard, 2004). Este trabajo aún está en curso (véase <http://web.pml.ac.uk/quest-fish/default.htm>).

Cheung *et al.* (2008), usando un enfoque algo diferente, referido al rango de distribución geográfica actual observado, los niveles tróficos, la producción primaria y las capturas, encontraron una relación significativa entre producción primaria y las capturas de las pesquerías, con una gran probabilidad de cambios en los emplazamientos en donde se realizan las capturas máximas. No obstante, muchas de las repercusiones de los cambios mundiales en los ecosistemas marinos serán probablemente de naturaleza no lineal, y los cambios pequeños en el forzamiento pueden dar lugar a respuestas de gran magnitud. Por ejemplo, Beaugrand *et al.* (2008) identificaron un límite térmico crítico en el Atlántico septentrional en el que, según se ha informado, ocurren alteraciones abruptas.

3.2 Estudios de caso

Un método de estudios de caso ilustra las respuestas generales y particulares de los ecosistemas marinos y de aguas dulces específicos al cambio climático. Los temas estudiados serán el Ártico, el Atlántico septentrional, el Pacífico septentrional, las surgencias, el Pacífico sudoccidental, los arrecifes de coral, los sistemas de agua dulce, y los sistemas de acuicultura.

3.2.1 Ártico

La Evaluación del Impacto Climático en el Ártico (ACIA, por su sigla en inglés) (Symon, 2005; véase también Schrank, 2007) consiste en evaluaciones y predicciones de las repercusiones del cambio climático en los ecosistemas árticos. Las hipótesis del cambio climático en los sistemas marinos del Ártico son muy inciertas porque la mayoría de los modelos se han enfocado en los efectos atmosféricos (Schrank, 2007).

TABLA 2
Cambios ecológicos de largo plazo con alta probabilidad de ocurrencia en los sistemas marinos del Ártico resultantes del calentamiento climático

	Fitoplancton	Zooplancton	Bentos	Peces	Mamíferos marinos y aves marinas
Distribución	Aumento del ámbito espacial de la producción primaria en el océano Ártico central.	Los límites de distribución se desplazan hacia el norte.	Los límites de distribución se desplazan hacia el norte.	Los límites de distribución se desplazan hacia el norte. Alteraciones en el período y en la localización de las áreas de desove, y en la alimentación.	Desplazamiento hacia el polo de la distribución de las especies.
Producción	Aumento de la producción en las plataformas continentales del océano Ártico, mar de Barents y mar de Bering.	Difícil de predecir; depende de la época de floración del fitoplancton y de la temperatura del agua.	Difícil de predecir; depende de la floración del fitoplancton y de la temperatura del agua. La producción de cangrejos y camarones puede disminuir.	Depende de la época de floración del fitoplancton y de las pautas de deriva de los huevos y larvas.	Disminuciones en las especies que viven en ambientes helados, y aumentos en las que viven en ambientes templados; la producción de aves marinas depende de la disponibilidad de alimento.
Composición y diversidad de las especies	Depende de la profundidad de la mezcla de aguas: una mezcla profunda favorece los flagelados.	Los copépodos árticos adaptables se ven favorecidos.	La abundancia de especies de aguas frías disminuye; las especies de aguas templadas aumentan en abundancia.	El bacalao, arenque, carbonero y algunos peces planos se desplazarán probablemente hacia el norte y serán más abundantes; el bacalao polar y el fletán negro tendrán distribución restringida y disminuirán en abundancia.	Disminución de los osos polares, focas anilladas, focas de Groenlandia, focas capuchinas, focas manchadas, focas fajadas, y quizá de las focas barbudas. Aumento de las focas comunes y grises. Posible disminución de varias especies de ballenas. La gaviota blanca y los mérgulos probablemente disminuirán.

Fuente: Loeng, 2005.

Los cambios físicos pronosticados para 2050 incluyen un aumento de la temperatura del aire de 5 °C, un aumento de las precipitaciones del 6 por ciento, un alzamiento del nivel del mar de 15 cm, un aumento de la nubosidad del 5 por ciento, una reducción de 20 días del período de duración de los hielos marinos y una reducción del 20 por ciento de los hielos invernales con grandes áreas libres de hielo en verano (Schränk, 2007). Las consecuencias ecológicas esperadas (nivel de confianza alto) de estos cambios físicos serán las siguientes (Tabla 2; Loeng, 2005; Schränk, 2007):

- a causa de la disminución de los hielos marinos la producción primaria puede incrementarse dos a cinco veces respecto al presente, aunque las consecuencias de estos cambios en relación con la concordancia y discordancia de esta producción con el zooplancton y con el resto de la red trófica no son claras;
- a causa del aumento de las temperaturas es muy probable que el ámbito de distribución de los peces de aguas frías y de las especies bentónicas se contraiga, pero que el de las especies del Atlántico y del Pacífico se expanda hacia el norte. Las especies longevas de Ártico cuya tolerancia térmica es escasa y cuyos períodos de reproducción son tardíos serán probablemente las primeras en desaparecer de los hábitats más sureños;
- es probable que se produzcan cambios en los períodos migratorios y que las tasas de crecimiento aumenten;
- es probable que las especies no nativas aumenten en aguas del Ártico, pero según la evaluación la extinción de las especies de peces hoy presentes en el Ártico es poco probable.

Según las predicciones, los mamíferos marinos endémicos (focas y ballenas) enfrentarán severos cambios en el hábitat, siendo el más importante la reducción de

los hielos marinos. El adelgazamiento de la banquisa y la ausencia de hielos en áreas muy extensas afectarán a los mamíferos que viven en las zonas cubiertas de hielo, tales como los lobos marinos, y podrían causar, dentro de décadas, la extinción de algunas poblaciones y posiblemente de algunas especies en escalas temporales más prolongadas (Kovacz y Lydersen, 2008).

3.2.2 *Atlántico septentrional*

Amplias zonas del océano Atlántico septentrional ya han sufrido las repercusiones de los cambios relacionados con el calentamiento del clima, incluido el fitoplancton (Edwards y Richardson, 2004), el zooplancton (Beaugrand *et al.*, 2002) y los peces (Quero, Du Buit Vayne, 1998; Perry *et al.*, 2005; Dulvy *et al.*, 2008). En el Atlántico septentrional, las condiciones del clima están fuertemente moduladas por cambios de presión atmosférica que responden al índice de oscilación del Atlántico norte. Es por eso que los detalles sobre las repercusiones futuras del cambio climático en esa zona variarán probablemente en consonancia con el estado de dicha oscilación. Si la tendencia al calentamiento prosigue y está acompañada por un alto índice oscilatorio, las temperaturas en el mar del Norte, los mares nórdicos y el mar de Barents subirán probablemente entre 1 °C y 3 °C durante los próximos 50 años, ocurriendo los cambios más acentuados en las regiones más septentrionales (Stenevik y Sundby, 2007). Además, se pueden esperar en estas regiones flujos de aguas cálidas del Atlántico provocados por el viento que harán aumentar la estratificación vertical (Stenevik y Sundby, 2007) y reducirán la cubierta de hielos (Ellingsen *et al.*, 2008). Las simulaciones indican que la producción primaria en el mar de Barents presumiblemente aumentará, aunque es probable que la producción de zooplancton disminuya a medida que merma la producción de zooplancton en el Ártico (Ellingsen *et al.*, 2008). Esto causará un desplazamiento hacia el norte de la distribución de todas las especies, e incrementará la producción de biomasa de las especies en las regiones ártico-boreales, pero ocasionará la introducción de invasores procedentes del sur en el mar del Norte meridional (Stenevik y Sundby, 2007).

Se predice que las áreas de desove del capelán en el mar de Barents se desplazarán hacia el este y que, a causa de las temperaturas más cálidas, el desove ocurrirá antes (Huse y Ellingsen, 2008). Un cambio importante en la circulación meridiana podrá tener efectos considerables en el mar de Barents (véase la Sección 1.3). Es probable que el mar del Norte llegue a estar dominado por especies pelágicas tales como el arenque y la caballa en el norte y la sardina y la anchoa en el sur, aunque la productividad total del sistema pueda no ser muy diferente de lo que es en la actualidad (Stenevik y Sundby, 2007). Se predice que el mar Báltico será más cálido y menos salino y que la estratificación vertical aumentará significativamente (Mackenzie *et al.*, 2007).

La biodiversidad del Báltico es particularmente susceptible a los cambios de salinidad; y se pronostica que el descenso de la salinidad será un factor de exclusión para muchas especies marinas tolerantes pero que favorecerá a otras más tolerantes de bajos índices de salinidad (Mackenzie *et al.*, 2007). Las especies no nativas podrán entrar en el Báltico, pero se espera que pocas especies estén en condiciones de establecer colonias en ese mar porque sufrirán estrés por salinidad (Mackenzie *et al.*, 2007).

Para el Atlántico noroccidental, las predicciones acerca de los efectos del cambio climático son similares a los formulados para el Atlántico nororiental en cuanto a cambios en los patrones de distribución y migración. Las poblaciones más afectadas serán las que se localizan en los límites de su rango de distribución; habrá además otros cambios relacionados con las tasas de crecimiento y la eficacia de reclutamiento que dependerán de las especies y de su ubicación (Drinkwater, 2000). En algunos lugares y en ciertos momentos, podrán registrarse temperaturas más bajas debido al aumento del derretimiento de los glaciares en Groenlandia. Estos lugares podrán representar para algunas especies de aguas frías zonas de refugio; pero otras, tales como el bacalao

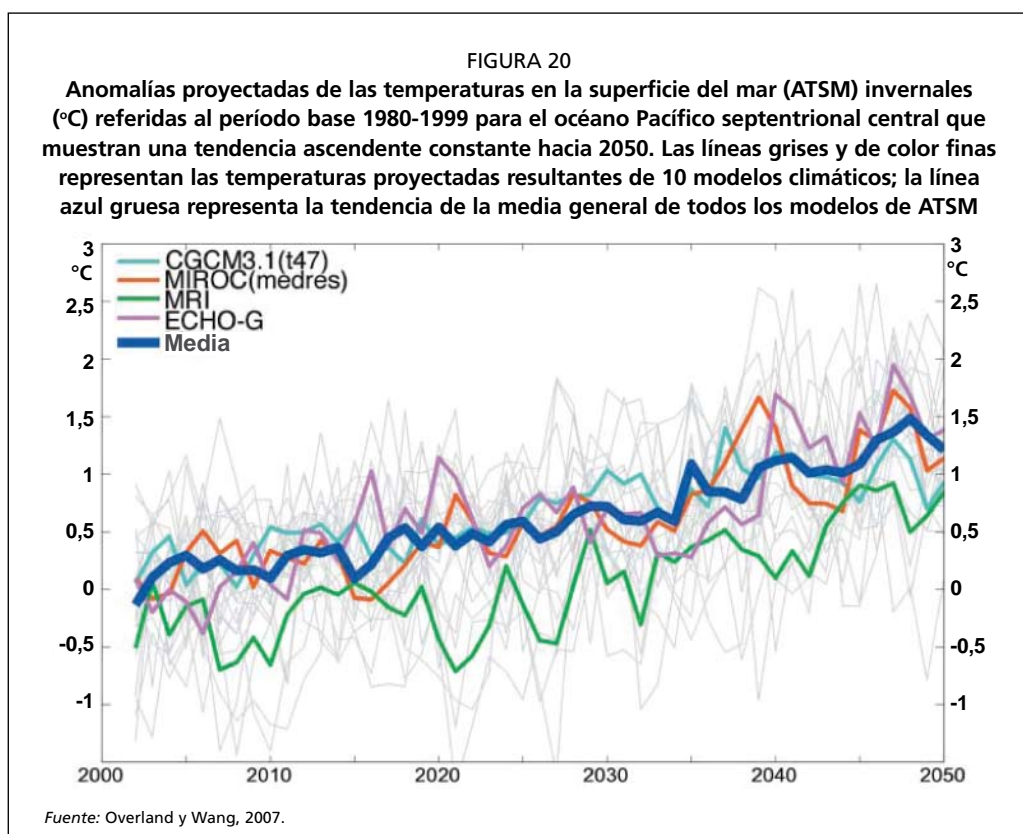
del Atlántico, podrán sufrir choques fríos letales (Vasseur y Cato, 2008). Las especies adaptadas a condiciones de temperatura frías y poco variables, tales como el salmón del Atlántico, podrán verse expulsadas de sus hábitats actuales debido a una combinación de efectos: el recalentamiento, las modificaciones del hábitat, la introducción de competidores y depredadores y el aumento del parasitismo (Vasseur y Cato, 2008).

El bacalao del Atlántico es una especie comercial importante en todo el Atlántico septentrional. En las zonas sudoccidentales de su rango de distribución, en el golfo de Maine y en el Banco Georges, el bacalao se encuentra en el límite sur de su área de distribución y por lo tanto es vulnerable al calentamiento y a la pérdida de su hábitat térmico (Fogarty *et al.*, 2008). En estudios de modelización, los índices de supervivencia del bacalao en el golfo de Maine disminuyeron con temperaturas cuyos aumentos contrarrestaron los incrementos de crecimiento que habían ocurrido bajo condiciones más cálidas; el resultado neto fue una pérdida de rendimiento pesquero (Fogarty *et al.*, 2008). En medio de su ámbito de distribución, en el Atlántico noroccidental, el capelán (*Mallotus villosus*) es una presa importante del bacalao, pero su período del desove puede sufrir atrasos debido al enfriamiento de las aguas por efecto del derretimiento de los glaciares (Vasseur y Cato, 2008). En el Atlántico nororiental, las simulaciones climáticas de temperaturas en el mar del Norte sugieren que el aumento de éstas determinará declives en la población de bacalao en dicho mar, en comparación con simulaciones que excluyen los efectos del cambio climático (Clark *et al.*, 2003).

3.2.3 Pacífico septentrional

Overland y Wang (2007) estudiaron las consecuencias para el océano Pacífico septentrional de los resultados arrojados por diez modelos sobre el cambio del clima atmosférico. Los autores concluyen que las repercusiones antropogénicas en el clima futuro del Pacífico septentrional dentro de 30 a 50 años serán tan intensas como lo es hoy la variabilidad climática natural. Esto parece indicar que las relaciones entre el clima, el ecosistema y la pesca, desarrolladas a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, podrían no tener la misma robustez en el siglo XXI. De lo anterior se deduce que el vínculo entre producción pesquera e índices del estado de la atmósfera, tales como la oscilación decádica del Pacífico, podrían dejar de tener validez a medida que el clima cambia.

Así como sucede con el Atlántico septentrional, en el Pacífico septentrional influye fuertemente la variación en intensidad y posición de los centros de presión atmosférica, que, tal como lo desvela la oscilación decádica, son indizados a través de las modificaciones de la temperatura en la superficie del mar en sentido este-oeste y norte-sur. Overland y Wang (2007) concluyen que este patrón de variabilidad decádica proseguirá durante el siglo XXI, pero que se añadirá a una tendencia ascendente persistente de la temperatura de la superficie del mar (Figura 20). Pierce (2004) modelizó los impactos del aumento de los gases de efecto invernadero en el plancton del Pacífico septentrional, y determinó que el sistema subpolar pasaba de un estado de fuerte variabilidad y valores mínimos en verano a un estado con valores anuales mucho más constantes y una productividad primaria anual promedio en disminución. La productividad aumentaba en otras regiones del Pacífico septentrional a medida que la subida de las temperaturas permitía tasas de crecimiento más altas. Pierce (2004) concluyó que sus resultados reflejaban muy claramente los cambios que se registran en las distintas profundidades de la capa de mezcla (efecto de los bancos de arena) y la temperatura (en aumento). Por el contrario, Hashioka y Yamanaka (2007) encontraron que las condiciones climáticas más templadas conducían a cambios en las pautas estacionales de producción primaria en el Pacífico noroccidental. En la costa occidental de América del Norte, los desplazamientos hacia el norte de las poblaciones de peces han sido pronosticados (Overland y Wang, 2007) y observados (véase p. ej. Okey, Wright y Brubaker, 2007). Welch, Ishida y Nagasawa (1998) han predicho que el hábitat



térmico apropiado para el salmón rojo (*Oncorhynchus nerka*) quedaría reducido al mar de Bering en el Pacífico septentrional con arreglo a una hipótesis de $2\times\text{CO}_2$.

Se pronostica que el mar de Bering en sí mismo sufrirá fuertemente los efectos del cambio climático, por ejemplo la retirada substancial de los hielos marinos, pérdidas de especies de aguas frías y aumento de la abundancia de especies provenientes del Pacífico septentrional (Overland y Stabeno, 2004). Tal como se observó más arriba (Sección 1.5), el Pacífico septentrional sub-Ártico es particularmente susceptible a los efectos del aumento de la acidificación, y para finales de este siglo algunas regiones estarán subsaturadas de aragonita desde la superficie hasta el fondo (Feely, Fabry y Guinotte, 2008). Ya se ha informado de afloramiento de aguas subsaturadas de aragonita en la plataforma continental de América del Norte occidental (Feely *et al.*, 2008). Se ha comprobado que varias especies de vertebrados e invertebrados han sufrido los efectos dañinos de estas bajas concentraciones de pH, en particular los pterópodos (presas comunes de muchos peces de alta mar) y jibias (Fabry *et al.*, 2008).

3.2.4 Sistemas de surgencia costeros impulsados por el viento

Los principales sistemas de surgencia costeros impulsados por el viento se localizan en los límites orientales de los océanos del mundo. De la interacción de la circulación propulsada por los vientos y la batimetría resultan ecosistemas sumamente productivos que contienen sobre todo especies pelágicas pero también algunas demersales. Sin embargo, las predicciones acerca de las repuestas de estos sistemas de surgencia son contradictorias, entre otras cosas porque se requieren modelos de mayor resolución para despejar las incógnitas relacionadas con la surgencia costera a escala mundial (véase la Sección 1.3). Bakun (1990) ha planteado que con el calentamiento mundial el gradiente barométrico tierra-mar del aire aumentaría y que en consecuencia se intensificaría el estrés de viento y los fenómenos de surgencia a lo largo de las costas. Como estas aguas de afloramiento son frías y ricas en nutrientes, su efecto compensaría en estas regiones la tendencia mundial al aumento de la temperatura del agua y a la estratificación vertical.

Synder *et al.* (2003) elaboraron un modelo de surgencia por viento en las costas de California con concentraciones crecientes de CO₂ atmosférico, y observaron que existía una estación en la que la surgencia aumentaba junto a ciertas variaciones estacionales. Los autores concluyeron que este efecto haría aumentar la productividad del sistema, contrarrestando quizá los efectos locales del alza de las temperaturas. McGregor *et al.* (2007) encontraron que el sistema de surgencia delante del África noroccidental se había intensificado durante el siglo XX, y postularon que se seguiría intensificando con el calentamiento mundial. Con esto, el sistema mantendría su elevada productividad en presencia de un clima cambiante, pese a que la composición de las especies pelágicas predominantes pueda variar (véase p. ej. Zeeberg *et al.*, 2008). Las repercusiones que se han pronosticado para algunas partes del sistema de surgencia de Benguela son sin embargo diferentes. Este es un sistema muy productivo, en el que a menudo el fitoplancton se deposita en el fondo del mar donde, descomponiéndose y consumiendo oxígeno, produce sulfuro de hidrógeno. El afloramiento a la superficie de estas aguas empobrecidas en oxígeno produce un importante desplazamiento de especies, que puede traducirse en mortalidad (Bakun y Weeks, 2004). Con el cambio climático, la intensificación de la surgencia de Benguela puede hacer aumentar aún más el aporte de nutrientes, la producción primaria y los episodios caracterizados por bajos índices de oxígeno (Clark, 2006).

La aparición de regiones hipóxicas y anóxicas en el sistema de surgencia de la corriente de California (Chan *et al.*, 2008) indica que en este sistema pueden ocurrir acontecimientos similares debidos al cambio climático. Por consiguiente, pese a las constantes predicciones del aumento de los vientos y la surgencia costera, cada sistema responderá diversamente a causa de sus características y antecedentes propios en cuanto a productividad, poblaciones consumidoras, etc.

Como se expuso a grandes rasgos en la Sección 1.3, se han formulado diferentes pronósticos acerca de las respuestas físicas al cambio climático, y algunos estudios han anticipado que los vientos podrían debilitarse (Vecchi, Clement y Soden, 2006). El modelo de producción primaria elaborado por Sarmiento *et al.* (2004) tampoco mostró una respuesta mundial coherente con los efectos del cambio climático en las regiones donde se manifiestan los fenómenos de surgencia.

3.2.5 Mares tropicales y subtropicales

Las regiones marinas tropicales y subtropicales contienen una gran variedad de hábitats, y cada uno de ellos posee una fauna muy diversificada (Roessig *et al.*, 2004). Se han realizado menos estudios sobre las respuestas potenciales de los océanos tropicales al cambio climático que sobre los efectos de este cambio en las latitudes templadas. Una pregunta sumamente importante –aún sin responder– es si el Pacífico tropical adoptará un carácter más afín a un ambiente dominado por el fenómeno de El Niño, en el cual el gradiente temporal medio este-oeste de la temperatura de la superficie del mar se reduce, o si asumirá una índole más semejante a La Niña, con un gradiente de temperatura de la superficie del mar este-oeste más elevado (Vecchi *et al.*, 2008).

Las simulaciones de respuestas de la producción primaria en el Pacífico tropical anuncian una disminución a causa del aumento de la estratificación y la disminución del suministro de nutrientes (Bopp *et al.*, 2005). Los efectos combinados de los cambios en la circulación, temperatura, nutrientes y producción primaria se transmiten en sentido ascendente por la totalidad de la red trófica e influyen en la disponibilidad de presas y las condiciones del hábitat para el atún (Loukos *et al.*, 2003). Las condiciones del hábitat del atún al este de la línea del cambio de fecha podrían mejorar, a semejanza de lo que ha ocurrido respecto a los fenómenos de recalentamiento de El Niño (Loukos *et al.*, 2003; véase también la Sección 2.2.2). Un resultado análogo ha sido confirmado por Watters *et al.* (2003), quienes aplicaron un enfoque de modelización diferente al Pacífico oriental tropical, en el cual se observó que la tendencia al recalentamiento

se traducía en una merma constante de la abundancia en todos los niveles tróficos, conforme la estratificación de la región aumentaba y los nutrientes escaseaban.

Hennessy *et al.* (2007) concluyeron que en el caso de las aguas que rodean a Australia y Nueva Zelandia, los mayores impactos del cambio climático serían padecidos por las especies costeras y en las zonas de cría submareales, por las especies endémicas de zonas templadas más que por las tropicales, y por las especies costeras y demersales más que por las pelágicas y del mar profundo. Hobday *et al.* (2006) y Poloczanska *et al.* (2007) han examinado los impactos pronosticados del cambio climático en los ecosistemas marinos que rodean Australia. Según los modelos, se prevén cambios físicos que son comparables a los de otras regiones: calentamiento del océano, aumento de la estratificación vertical, refuerzo de las corrientes costeras en dirección al polo, acidificación creciente del océano, subida del nivel del mar y alteración del régimen de tormentas y lluvias (Poloczanska *et al.*, 2007).

Los análisis de Hobday *et al.* (2006) expresan que el calentamiento y el aumento de la estratificación producirán perturbaciones en la composición de las comunidades planctónicas, orientarán la distribución de éstas hacia el polo y modificarán la dinámica de su período de floración, con perjuicio para los procesos de transferencia a los niveles tróficos superiores. Las áreas de distribución de los peces bentónicos y demersales se desplazarán hacia el sur y las poblaciones pueden perder abundancia. La distribución de las especies pelágicas también registrará un desplazamiento hacia el sur, y algunas especies se beneficiarán con el aumento de los fenómenos de surgencia debidos al viento (p. ej., la anchoa). Hobday *et al.* (2006) concluyeron que las regiones marinas centro-oriental y sudoriental de Australia eran las más vulnerables a las repercusiones climáticas y a otros factores de estrés.

3.2.6 Arrecifes de coral

Los ecosistemas coralíferos se forman en las regiones de aguas cálidas y frías del océano Mundial, y constituyen uno de los lugares más emblemáticos del mundo. Son el hábitat de un cuarto de todas las especies marinas, y para muchos países en desarrollo representan fuentes importantes de proteínas y de ingresos (Parry *et al.*, 2007). Están expuestos a riesgos relacionados con las repercusiones del cambio climático debido al aumento de las temperaturas, la acidificación de los mares, la intensificación de las tormentas y el alzamiento del nivel de los mares (véase la Sección 2.2.2), y debido a factores no climáticos tales como la sobreexplotación, la introducción de especies exóticas y el incremento de la carga de nutrientes y sedimentos. Los riesgos que pesan sobre los arrecifes de coral no están distribuidos homogéneamente: el aumento de las temperaturas es el problema más importante para los sistemas de aguas templadas; el de la acidificación y la decalcificación lo es tanto para los sistemas de aguas templadas como para los de aguas frías (véase p. ej. Feely, Fabry y Guinotte, 2008), y las repercusiones directas ocasionadas por el hombre lo es para las regiones más pobladas. Sin embargo, Graham *et al.* (2006) han señalado que incluso los sistemas de arrecifes aislados y remotos pueden correr graves riesgos debido a las solas repercusiones del cambio climático.

Se pueden plantear tres escalas temporales para dar cuenta de las repercusiones relacionadas con los cambios climáticos en los sistemas de arrecifes de coral:

- escala de años: efectos del aumento de las temperaturas en el descoloramiento de los corales, que se han hecho más frecuentes desde los últimos fenómenos de oscilación meridional El Niño y que pueden conducir a una degradación constante de los arrecifes;
- escala de unas pocas décadas: aumento de la acidificación y destrucción del armazón carbonatado de los arrecifes;
- escala de varias décadas: debilitamiento de la integridad estructural de los arrecifes y mayor susceptibilidad a las tormentas y a fenómenos erosivos resultantes del

aumento de las temperaturas y la acidificación, que tienen como consecuencia cambios profundos en la composición de los corales.

Los ecosistemas coralíferos son por lo general capaces de recuperarse tras episodios de estrés ambiental débiles, tales como el aumento de la temperatura o la reducción de la calcificación, siempre que los factores de estrés agudos y prolongados –por ejemplo los picos térmicos causados por El Niño, las enfermedades o las tempestades intensas– no sean demasiado severos y frecuentes (Buddemeier, Kleypas y Aronson, 2004). Una combinación de factores de estrés crónicos y agudos puede determinar un cambio de régimen y la sustitución de los corales por sistemas dominados por algas (Hughes *et al.*, 2003).

En el Indo-Pacífico, se cree que los frecuentes episodios de El Niño causantes de descoloramiento tienen efectos inhibitorios sobre los corales porque no dan a éstos tiempo suficiente para recuperarse entre dos episodios sucesivos (Buddemeier, Kleypas y Aronson, 2004). Los fenómenos de descoloramiento ocurren cuando las temperaturas del mar superan en 1 °C la media de las temperaturas de verano durante más de cuatro semanas (Hoegh-Guldberg, 1999). Según los modelos de cambio climático, se predice que estos umbrales se superarán más a menudo y que por consiguiente la frecuencia de los episodios de descoloramiento superará la capacidad de recuperación de los corales (Donner *et al.*, 2005). De mantenerse este umbral inalterado, es posible que en la mayor parte de los arrecifes los episodios de descoloramiento sean más numerosos y que la mortalidad de los corales aumente entre 2030 y 2050 (Parry *et al.*, 2007).

A largo plazo, el aumento de la acidez (disminución del pH) de los océanos del mundo representa una poderosa amenaza para los arrecifes de coral. Aunque la respuesta *in situ* del crecimiento de los corales al incremento de la acidez se desconoce (Parry *et al.*, 2007), los estudios de laboratorio indican que la disminución de saturación de aragonita a un nivel reducido de pH puede interrumpir la calcificación de los corales (Orr *et al.*, 2005). Este efecto puede ser especialmente grave para los corales de aguas frías profundas como los que se encuentran a lo largo de los taludes continentales del Pacífico nororiental, donde los niveles de saturación de aragonita ya han alcanzado zonas menos profundas, comprendidas entre los 90 y los 150 m (Feely, Fabry y Guinotte, 2008). En aguas templadas, el aumento de la acidez hará disminuir la calcificación y debilitará el esqueleto de los corales a tal punto que para 2070 se predice una reducción de la cobertura coralífera y una mayor erosión de los arrecifes (Parry *et al.*, 2007).

La capacidad de adaptación de los sistemas coralíferos a los factores de estrés ambiental es incierta. El reemplazo de las zooxantelas simbióticas por especies más tolerantes a las altas temperaturas podría reducir el descoloramiento y postergar la desaparición de los arrecifes de 2050 a 2100 (Parry *et al.*, 2007). La migración de los corales a latitudes más altas se considera improbable a causa de la falta de substratos idóneos y a las más bajas concentraciones de aragonita en latitudes superiores (Parry *et al.*, 2007).

Buddemeier, Kleypas y Aronson (2004) calcularon que un recalentamiento de 2 °C de los océanos determinaría solo una muy pequeña expansión del ámbito térmico de los corales (que en la actualidad están confinados por la isoterma de los 18 °C). De acuerdo con al menos un estudio (Jones *et al.*, 2004) sobre Papua Nueva Guinea, el declive de los corales ha tenido consecuencias negativas en la biodiversidad íctica de los arrecifes. Sin embargo, hasta la fecha ha habido escasas pruebas de un nexo entre recalentamiento del clima y episodios de descoloramiento con repercusiones en las pesquerías costeras (véase p. ej. Grandcourt y Cesar, 2003). Pero no hay duda de que el debilitamiento y erosión masivos de los arrecifes de coral a lo largo del tiempo tendrá efectos graves en los animales cuya alimentación y hábitat dependen de estos arrecifes.

3.2.7 *Sistemas de aguas dulces*

Los lagos de agua dulce y sus ecosistemas son muy vulnerables al cambio climático. A escalas temporales muy largas (superiores a los 100 años), los registros paleográficos han mostrado que las formas y áreas de distribución de los lagos se han alterado; y que, a causa de procesos relacionados con el clima, lagos han desaparecido por completo a causa de variaciones en la dinámica de precipitación, evaporación y escorrentía (Poff, Brinson y Day, 2002).

En general, y a escalas temporales largas (varias décadas), en América del Norte la respuesta anticipada es que las especies de aguas frías se verán afectadas negativamente, que las de aguas templadas se verán afectadas positivamente y que las de aguas frescas se verán afectadas positivamente en la parte norte pero negativamente en la parte sur de su área de distribución (Mohseni, Stefan y Eaton 2003; Field *et al.*, 2007). Se espera que las especies de aguas frescas y templadas se desplacen en general hacia el norte en América del Norte y probablemente también en el resto del hemisferio norte. Sin embargo, la respuesta de determinados ecosistemas lacustres al cambio climático dependerá fuertemente del tamaño, profundidad y situación trófica del lago.

En un estudio de modelación de los efectos del cambio climático ($2\times\text{CO}_2$) en los lagos de América del Norte central, Stefan *et al.* (1995) llegaron a la conclusión de que los peces de aguas frías serían los más afectados debido a la pérdida de sus hábitats óptimos en los lagos eutróficos de aguas someras. Las condiciones de crecimiento de los peces de aguas frescas y templadas podrían mejorar en los lagos adecuadamente mezclados, en los lagos pequeños y en aquellos con un ambiente de nutrientes oligotróficos. Dado que en los lagos las tasas de producción de presas invertebradas aumentan de forma logarítmica con la temperatura (los aumentos son de dos a cuatro veces por un incremento de 10 °C; Watson *et al.*, 1997), a largo plazo la producción íctica registrará un aumento, a pesar de que este efecto puede quedar anulado por los cambios en la composición de las especies de presas (Watson *et al.*, 1997).

Sin embargo, a corto plazo, los desajustes temporales entre los depredadores de los peces y sus presas zooplanctónicas pueden inicialmente ocasionar una baja en la producción íctica debido a desfases cronológicos (Watson *et al.*, 1997). Problemas similares en cuanto a discordancias de productividad y tiempos se han formulado como hipótesis probable en los lagos poco profundos de los Países Bajos (Mooij *et al.*, 2005). El ritmo de cambio de los sistemas dulceacuícolas frente al clima dependerá de la capacidad de las especies de agua dulce de «desplazarse entre ambientes», es decir de la existencia de corredores de dispersión; pero éstos pueden ser objeto de fuertes alteraciones causadas por las actividades humanas (Poff, Brinson y Day, 2002). Es probable que los más afectados resulten ser los peces de zonas de tierras bajas que carecen de corredores de dispersión hacia el norte y en general las especies de aguas frías (Poff, Brinson y Day, 2002).

Los ecosistemas dulceacuícolas son además sistemas muy diversificados biológicamente que albergan alrededor del 40 por ciento de todas las especies de peces, pese a que representan solo una pequeña proporción (el 0,01 por ciento en volumen) de los hábitats acuáticos (Arthington *et al.*, 2003). Aunque es difícil recolectar datos al respecto, en las zonas estudiadas cerca del 20 por ciento de las especies de agua dulce está amenazado, en peligro o se ha extinguido (Revenga *et al.*, 2000). La protección de la biodiversidad en los ambientes de agua dulce se reconoce cada vez más como uno de los objetivos principales de la conservación (Abell, Thieme y Lehner, 2002).

3.2.8 *Sistemas de acuicultura*

Handisyde *et al.* (2006) y De Silva y Soto (2009) observaron que las repercusiones del cambio climático en la acuicultura son tanto directas (se manifiestan p. ej. en procesos físicos y fisiológicos) como indirectas (p. ej. a través de problemas relacionados con los suministros de harina de pescado y el comercio). Aquí se discutirán solo los problemas

directos. Handisyde *et al.* (2006) señalaron que las alteraciones físicas estaban relacionadas con el cambio climático –p. ej., en la temperatura, la irradiación solar, el movimiento de las corrientes y mareas, el aumento del nivel de los mares, el estrés hídrico y la frecuencia de fenómenos extremos– y que repercutirán en los procesos fisiológicos, ecológicos y operativos (p. ej., en las especies y la selección de sitios, en las tecnologías de contención, etc.).

El Tercer informe de evaluación del IPCC (McLean y Tsyban, 2001) identificó los impactos del cambio climático en la acuicultura; dichos impactos fueron reiterados en el Cuarto informe de evaluación (Easterling *et al.*, 2007). Los impactos negativos incluyen:

- el estrés debido al aumento de las temperaturas y a la demanda de oxígeno;
- la incertidumbre en el suministro de agua dulce;
- los acontecimientos climáticos extremos;
- el aumento del nivel de los mares;
- la mayor frecuencia de enfermedades y episodios de toxicidad;
- la incertidumbre en el suministro de harina de pescado producida por las pesquerías de captura.

Los impactos positivos del cambio climático en la acuicultura incluyen el incremento de eficiencia del índice de conversión de alimento y de la tasa de crecimiento en las zonas de aguas más cálidas, la prolongación de la temporada de crecimiento y la expansión hacia los polos del ámbito de distribución geográfica debido a la retirada de los hielos (Easterling *et al.*, 2007).

El eventual aumento de la producción primaria en las zonas dedicadas a la acuicultura se traduciría en más alimentos para los invertebrados que se alimentan por filtración (Alcamo *et al.*, 2007). Pueden también presentarse otros problemas debidos a invasiones de especies exóticas, a la disminución de la concentración de oxígeno y quizá al aumento de la proliferación de algas nocivas (Alcamo *et al.*, 2007), aunque estas últimas están también muy influenciadas por factores no climáticos. Las condiciones locales en las zonas de cría tradicionales pueden volverse inapropiadas para muchas especies, que se verían obligadas a desplazarse hacia los polos (Stenevik y Sundby, 2007) o hacia aguas mar adentro más frescas, o que serían sustituidas por otras especies (Clemmensen, Potrykus y Schmidt, 2007).

De Silva y Soto (2009) han hecho una revisión de las repercusiones potenciales del cambio climático en la acuicultura. Los autores indican que la mayor proporción (50 a 70 por ciento) de las actividades acuícolas se desarrolla en las regiones tropicales y subtropicales, en particular en Asia. El grupo taxonómico con la más alta productividad es el de los peces. Esta producción tiene lugar predominantemente en agua dulce, mientras que el cultivo de crustáceos es mayor en aguas salobres y la de moluscos en aguas marinas. De Silva y Soto (2009) concluyeron que los efectos del cambio climático (véanse p. ej. las Secciones 1.1.2, 2.2.3, y 3.2.7) en la acuicultura de agua dulce en las regiones tropicales y subtropicales es difícil de predecir.

El aumento de la temperatura del agua y del crecimiento del plancton resultante de los procesos de eutrofización, pueden elevar las tasas de crecimiento y productividad de las especies cultivadas (McCauley y Beiting, 1992). Según las condiciones locales, las variaciones en la disponibilidad de agua, los fenómenos climatológicos extremos, la estratificación vertical y el suministro de nutrientes pueden tener efectos negativos en la producción de acuicultura en agua dulce. Los cultivos marinos pueden verse perjudicados por los cambios en la salinidad (aumento o disminución), que dependerán también de las condiciones locales relacionadas con la escorrentía, la circulación marina, etc. La acuicultura en regiones templadas puede verse menoscabada por la mayor prevalencia de patógenos debido a que las temperaturas registran subidas más rápidas en las regiones de baja latitud (véase p. ej. Handisyde *et al.*, 2006), además del estrés fisiológico en las especies cultivadas. La Tabla 3 resume las repercusiones potenciales del cambio climático en la acuicultura.

TABLA 3
Repercusiones potenciales del cambio climático en los sistemas de acuicultura

Generador del cambio	Repercusiones en la piscicultura y en la acuicultura	Repercusiones operativas
Cambios en la temperatura de la superficie del mar	<p>Aumento de la proliferación de algas perjudiciales.</p> <p>Disminución del O₂ disuelto.</p> <p>Aumento de las enfermedades y parásitos.</p> <p>Prolongación de las temporadas de crecimiento.</p> <p>Cambios en la ubicación y ámbito de distribución de las especies adecuadas.</p> <p>Reducción de la mortalidad natural en invierno.</p> <p>Aumento del índice de crecimiento y de transformación alimentaria.</p> <p>Competencia, parasitismo y depredación producidos por la alteración de los ecosistemas locales, los competidores y las especies exóticas.</p>	<p>Cambios en la infraestructura y en los costos operacionales.</p> <p>Aumento del número de organismos obstrutores, plagas, especies nocivas y depredadores.</p> <p>Expansión del área de distribución geográfica de las especies.</p> <p>Cambio en los niveles de producción.</p>
Cambios en otras variables oceanográficas	<p>Disminución de los índices de flujo y de la disponibilidad de alimento para los crustáceos.</p> <p>Cambios en la abundancia de las especies usadas para la producción de alimentos y harina.</p>	<p>Acumulación de desechos bajo las redes.</p> <p>Aumento de los costos operativos.</p>
Subida del nivel del mar	<p>Pérdida de áreas dedicadas a la acuicultura.</p> <p>Pérdida de áreas que proporcionan refugio.</p> <p>Aumento del riesgo de inundaciones.</p> <p>Infiltraciones de sal en las capas freáticas.</p>	<p>Daños a las infraestructuras.</p> <p>Cambios en la determinación de zonas adaptadas a las actividades acuícolas.</p> <p>Aumento de los costos de seguros.</p> <p>Reducción en la disponibilidad de agua dulce.</p>
Intensificación de las tormentas	<p>Aumento del tamaño de las olas.</p> <p>Marejadas ciclónicas más altas.</p> <p>Inundaciones causadas por precipitaciones.</p> <p>Cambios en la salinidad.</p> <p>Daños estructurales.</p>	<p>Pérdida de poblaciones en cultivo.</p> <p>Daños a las instalaciones.</p> <p>Aumento de los costos por diseño de nuevas instalaciones.</p> <p>Aumento de los costos de seguros.</p>
Estrés hídrico y por sequía	<p>Cambios en la salinidad.</p> <p>Empeoramiento de la calidad del agua.</p> <p>Aumento de las enfermedades.</p> <p>Inseguridad en el abastecimiento hídrico.</p>	<p>Pérdida de capital.</p> <p>Daños a las instalaciones.</p> <p>Conflictos con los usuarios exteriores de aguas.</p> <p>Reducción de la capacidad productiva.</p> <p>Modificaciones en las especies cultivadas.</p>

Fuente: tomado con modificaciones de Handisyde *et al.*, 2006.

3.3 Factores de incertidumbre y lagunas en la investigación

La predicción de las repercusiones del cambio climático en los ecosistemas marinos y acuáticos se ve dificultada por muchos factores de incertidumbre y carencias en materia de investigación. Algunos pronósticos, tales como los efectos y cambios en la distribución de poblaciones situadas en las partes limítrofes norteñas y sureñas de sus ámbitos pueden realizarse, por lo general al menos, con un alto nivel de confianza.

La predicción de repercusiones respecto a una región específica o una zona local tendrá un grado de confianza menor debido a que los factores locales pueden tener en ese caso una importancia mayor. No obstante, si estos factores pueden ser identificados y entendidos, será posible formular predicciones locales sobre los impactos climáticos con un elevado grado de confianza. Esta observación ilustra que una de las mayores incertidumbres en la predicción de repercusiones está relacionada con los efectos sinérgicos que se ejercen en las poblaciones marinas y dulceacuícolas

cuando intervienen factores de estrés múltiples de tipo climático y no climático. Éstos se manifestarán probablemente con dinámicas e interacciones no lineales muy marcadas (véase p. ej. Scheffer *et al.*, 2001b). Quizá las principales interacciones sean las debidas al aumento de la temperatura (Sección 1.1), a la disminución de los aportes de oxígeno (tanto en concentraciones absolutas, Sección 1.5, como en cuanto a la capacidad de satisfacer las necesidades metabólicas de los tejidos, Sección 2.1.1), al decremento de la salinidad (Sección 1.2), al aumento de la acidificación (Sección 1.5) y las que se vinculan con los efectos sobre la pesca (véase p. ej. Planque *et al.*, 2008; Perry *et al.*, 2008). En los sistemas de agua dulce a esta lista se pueden añadir las repercusiones relacionadas con las variaciones en los flujos hídricos y con la demanda hídrica para distintos usos (Secciones 1.1 y 1.6).

La información recabada en el desarrollo de las actividades acuícolas debería ser sistematizada con el fin de establecer márgenes de tolerancia bioclimática de las especies. Se necesita realizar investigaciones para determinar las relaciones causales de las especies claves o de «alto impacto» cuyos efectos en las características y funciones del sistema pueden ser importantes. Hsieh *et al.* (2006) argumentan que, un ecosistema de complejidad aminorada por efecto de la eliminación de especies que han sido objeto de sobreexplotación podría ser menos capaz de recuperación ante las perturbaciones ocasionadas por el cambio climático. Tanto a escala mundial como regional, las consecuencias del cambio climático en la producción primaria neta son muy inciertas, como lo es la manera en que esta producción pueda responder a las variaciones significativas de la circulación termohalina (Sección 1.3).

Sigue siendo muy incierta la dirección de los efectos (en aumento o disminución) del cambio del clima en los sistemas de surgencia, en particular los afloramientos costeros impelidos por el viento. Este es un importante tema de investigación pues las zonas de surgencia son regiones muy productivas donde se desarrollan pesquerías de gran valor.

Aún quedan problemas por investigar sobre la situación de los modelos de simulación; por ejemplo, en cuanto a su grado de resolución (física, biogeoquímica y ecológica), su integración en diferentes escalas, los niveles de certidumbre de las proyecciones y la carencia de suficientes datos de validación y forzamiento (véase p. ej. Werner *et al.*, 2007). Los modelos de circulación oceánica general usados para las proyecciones del estado futuro del ecosistema marino en respuesta al clima tienen actualmente una resolución espacial de un grado (cuadrículas de 100 x 100 km; véase p. ej. Sarmiento *et al.*, 2004). Sin embargo, para el rastreo de los procesos físicos que determinan las respuestas biogeoquímicas y biológicas se requiere una resolución del orden de algunos kilómetros en el océano abierto y una resolución aún mayor en las regiones costeras.

Los modelos climáticos regionales y los métodos usados para reducir las variables y fenómenos a escala regional, por ejemplo por anidamiento (Hermann *et al.*, 2002; Snyder *et al.*, 2003; Clark, 2006; Penven *et al.*, 2006; Vikebø *et al.*, 2007), están dando resultados reveladores. Los enfoques metodológicos para vincular los modelos a escala de la cuenca a los dominios costeros (véase p. ej. Chassignet *et al.*, 2006) y los avances en materia de redes adaptativas y no estructuradas refinadas parecen ser prometedores (véase p. ej. Pain *et al.*, 2005). Los modelos de circulación general atmósfera-océano deberían incluir informaciones y resultados específicos para evaluar los impactos del cambio climático en los sistemas marinos. La relación entre cambios a largo plazo esperados y variabilidad decádica (y de plazos más breves) es fundamental para comprender los efectos del clima en las pesquerías.

Los métodos y modelos de regionalización de cambios climáticos oceánicos también son procedimientos críticos para formular pronósticos realistas acerca de las repercusiones. Los actuales modelos del cambio de la producción marina primaria mundial son muy sensibles al efecto de la temperatura, y deberían por lo tanto ser un tema destacado en los estudios de campo y trabajos teóricos futuros.

Los sistemas marinos y acuáticos han estado sometidos a temperaturas cálidas en el pasado, a las que han respondido con cambios significativos en cuanto a áreas de distribución y mediante la reorganización de la composición de las comunidades de especies (véase p. ej. Finney *et al.*, 2002; Drinkwater, 2006). Lo que los sistemas marinos no han conocido, al menos según las estimaciones que se puedan hacer de la época preindustrial, es una acidificación tan intensa como la actual (Orr *et al.*, 2005) y que se predice puede aumentar.

Las repercusiones en gran escala en los sistemas marinos de la interacción entre temperaturas en aumento e intensificación de la acidificación son desconocidas.

En contraste con algunos experimentos en que la adaptación no es posible, Pelejero *et al.* (2005) observaron que grandes corales del género *Porites* de 300 años de edad del Pacífico sudoccidental se habían adaptado a amplios ciclos de variación de 50 años del pH y que covariaban con la oscilación decádica del Pacífico, lo que sugiere que en algunos ecosistemas de arrecifes de coral la adaptación a los cambios de pH a largo plazo es posible. La investigación sobre las repercusiones de las altas concentraciones de CO₂ en los océanos está aún en su infancia y necesita ser desarrollada rápidamente.

Las repercusiones de la pesca en la capacidad detallada de las poblaciones marinas y de los ecosistemas de responder al cambio climático también son desconocidas, pero algunas características sí se pueden describir (Planque *et al.*, 2008; Perry *et al.*, 2008). A causa de la pesca, las poblaciones marinas se vuelven más susceptibles a la variabilidad climática y al cambio climático. Esto se debe a la remoción de las clases de edades más viejas y de las subunidades espaciales y porque algunos rasgos del ciclo biológico se modifican, por ejemplo la edad al primer desove se reduce (Perry *et al.*, 2008). La pesca también determina la reducción del tamaño medio de los individuos, la disminución del nivel trófico y el aumento de la tasa de rotación del componente íctico de las comunidades marinas; y refuerza en los ecosistemas los mecanismos de control ascendente (Perry *et al.*, 2008).

Hsieh *et al.* (2006) analizaron los datos sobre el ictioplancton recogidos por la Cooperativa de Investigaciones Pesqueras Oceánicas de California (CalCOFI), mostrando que la variabilidad interanual era más alta en las especies explotadas que en las sin explotar, incluidas las pelágicas. El principal proceso constatado parece ser que la explotación hace disminuir el número de peces pertenecientes a las clases de edad más viejas. Los peces más viejos son más fecundos que los jóvenes, producen huevos de mejor calidad, realizan migraciones más extensas y amortiguan los efectos de la variabilidad interanual del reclutamiento (Beamish, McFarlane y Benson, 2006). El resultado neto de todo esto es que la resiliencia de los sistemas marinos disminuye y la susceptibilidad al estrés debido a la variabilidad y al cambio climático aumenta.

Existen factores significativos de incertidumbre respecto a la respuesta de los animales, poblaciones, comunidades y ecosistemas marinos y acuáticos al cambio climático que tienen que ver con la función de los efectos de retroalimentación, los umbrales críticos y los puntos de transición a diferentes estados de estabilidad. Tales umbrales comprenden por cierto límites de tolerancia ante los factores letales, por ejemplo temperaturas por encima de las cuales un organismo muere por conmoción térmica, pero los umbrales límite también se alcanzan a niveles (inicialmente) subletales en los que el sistema fisiológico se encuentra sometido a estrés excesivo (Pörtner y Knust, 2007) o en los que las relaciones de comensalismo se interrumpen (blanqueado de los corales).

Ya se han observado cambios considerables en el estado de los sistemas marinos (Scheffer *et al.*, 2001a; de Young *et al.*, 2008). Los puntos en que existen tales umbrales variarán según las diferentes especies, sistemas y factores de estrés, y muchos de éstos son aún desconocidos. Cuando se franquean estos umbrales y se producen cambios significativos se suele decir que ha habido «sorpresas».

También se desconoce, por lo general, cuál es la capacidad de los organismos marinos de adaptarse y evolucionar ante el cambio climático y en qué escala temporal. Se dispone de algunas pruebas de que, a causa de los efectos de los años cálidos y fríos, las cohortes de peces presentan diferencias genéticas (Smith, 1979). Una evolución y adaptación rápidas, al menos a los factores de estrés provocados por la pesca, puede ocurrir en una escala temporal relativamente rápida de unas pocas décadas (de Roos, Boukal y Persson, 2006; Law, 2007).

Berteaux *et al.* (2004), estudiaron las alteraciones evolutivas potenciales en respuesta al cambio climático en los animales terrestres del Ártico y concluyeron, que los cambios evolutivos debidos a la selección natural pueden ocurrir en una escala temporal de unas pocas décadas, aunque notaron que no todas las especies están igualmente capacitadas para llevar a cabo tales cambios. A causa del pequeño tamaño de su población efectiva, las especies con tiempos de generación más largos y las especies clonales pueden tardar más antes de manifestar una respuesta evolutiva (Harley *et al.*, 2006).

Las especies de ciclo biológico complejo, como los salmónidos, pueden experimentar presiones de selección opuestas debido a las repercusiones que el cambio climático ejerce en las diferentes etapas del ciclo biológico (Crozier *et al.*, 2008). Tal como ha sido indicado por Stockwell *et al.* (2003), la respuesta evolutiva estará condicionada por la intensidad del proceso de selección, el tamaño de la población, las variaciones genéticas y los flujos de genes, factores que determinan que la mayor parte de las especies deban ser tratadas como casos relativamente únicos.

Para la detección de los efectos del cambio climático es necesario aumentar y afinar los mecanismos de seguimiento bio-oceanográficos y de las modificaciones ambientales, tanto

desde fuera como dentro del agua mediante instrumentos sumergidos. Lo ideal sería hacer mediciones no solo de parámetros como la concentración de clorofila y la productividad, sino también respecto de la taxonomía (para determinar qué organismos existen) y de la fisiología del plancton (para conocer el estado de salud de los organismos). Las nuevas tecnologías de teledetección servirían para vencer estas dificultades.

4. RESUMEN DE LAS INVESTIGACIONES

4.1 Cambio climático: sus bases físicas en los sistemas marinos y de aguas dulces

4.1.1 Contenido de calor y temperatura

- Los océanos se están calentando, pero con algunas diferencias ligadas a su localización geográfica y exhibiendo una cierta variedad decádica.
- El calentamiento no es exclusivo de las aguas superficiales, y el Atlántico muestra signos muy claros de un calentamiento en aguas profundas.
- Los recursos de agua dulce son vulnerables al cambio climático y pueden sufrir severos impactos. Muchos lagos han registrado un calentamiento de moderado a fuerte desde el decenio de 1960.
- El nivel de los lagos (que condiciona las repercusiones derivadas de la temperatura) ha ido disminuyendo en muchas zonas debido principalmente a los usos humanos, pero los patrones de pluviosidad también han influido en este decremento.
- Se espera que la escorrentía fluvial aumente en latitudes elevadas y disminuya en algunas partes de África occidental, Europa meridional y América Latina meridional.
- El calentamiento futuro de los lagos africanos es preocupante, visto que las predicciones de la temperatura atmosférica para el continente apuntan a aumentos superiores al promedio mundial, y que, según las proyecciones, las lluvias disminuirán en algunas partes de África.

4.1.2 *Salinidad y estratificación*

- En términos generales, la salinidad va en aumento en las aguas oceánicas superficiales en las regiones de mayor evaporación, mientras que la tendencia es a la disminución en las altas latitudes.
- Por el efecto combinado de los cambios de temperatura y salinidad debidos al calentamiento del clima, la densidad de la superficie del océano podría reducirse, la estratificación vertical aumentar y la mezcla superficial sufrir alteraciones, pero con algunas diferencias geográficas.
- Se han observado grandes anomalías en el índice de salinidad en el pasado que han desencadenado importantes respuestas del ecosistema.

4.1.3 *Circulación oceánica y surgencia costera*

- Durante la segunda mitad del siglo XX se ha observado una reducción de cerca del 30 por ciento de la circulación termohalina meridional. Se espera que esta reducción se acreciente a consecuencia del aumento de los aportes de agua dulce en el Ártico y Sub-Ártico, la mayor estabilidad de la capa de mezcla superficial, la disminución de los flujos de sales, la reducción de las corrientes oceánicas de convección y una menor formación de aguas profundas. Estos fenómenos tendrían efectos importantes en los componentes físicos y biológicos del ecosistema noratlántico.
- Existen algunas pruebas de que los fenómenos de surgencia se han ido intensificando en décadas recientes en varias zonas (California, África noroccidental, mar Arábigo), que concuerdan con la hipótesis que el calentamiento mundial conduciría al aumento de la surgencia debido a un mayor estrés eólico a lo largo de las costas. Sin embargo, según una hipótesis alternativa, este efecto sería contrarrestado por el calentamiento diferenciado polo-ecuador y el aumento de la estratificación. Las simulaciones ecosistémicas de baja resolución indican que no existe una pauta discernible sobre una respuesta de la surgencia al calentamiento a escala mundial, salvo en una zona comprendida entre dos grados del ecuador, donde se espera una reducción leve.
- Hay indicios de que el cambio climático puede afectar la estacionalidad de los fenómenos de surgencia, con importantes consecuencias en la red trófica.

4.1.4 *Aumento del nivel del mar*

- El nivel mundial promedio del mar ha registrado una subida promedio de 1,8 mm por año desde 1961. El ritmo de alzamiento se ha acelerado desde 1993 hasta aproximadamente 3,1 mm por año. Es posible que en las próximas décadas se registren nuevos aumentos. No obstante, las variaciones del nivel del mar no son homogéneas geográficamente, porque están controladas por procesos regionales de circulación oceánica.
- Las mayores pérdidas esperadas derivadas de la subida del nivel del mar tendrán lugar en las costas del Atlántico y del Golfo de México de las Américas, en el Mediterráneo, en el Báltico y en las pequeñas regiones insulares.
- Los hábitats de los humedales inter-mareales y costeros pueden reducirse substancialmente en el futuro a causa de la subida del nivel del mar.

4.1.5 *Acidificación y otras propiedades químicas*

- El pH de la superficie del agua ha disminuido en 0,1 unidades en los últimos 200 años. Según estimaciones modelizadas, se predicen nuevas reducciones de 0,3 a 0,5 unidades de pH durante los próximos 100 años.
- Las repercusiones biológicas de la acidificación de los océanos son inciertas porque la susceptibilidad de los individuos y las poblaciones es desconocida. Sin embargo, se espera que para los crustáceos, los arrecifes de coral tropicales y los corales de aguas frías del Océano meridional las repercusiones puedan ser graves.

- La concentración de oxígeno en la capa ventilada de 100 a 1 000 m del océano Mundial ha ido disminuyendo desde 1970 debido al bajo índice de renovación en las aguas intermedias.
- Es probable que a causa del calentamiento mundial el suministro de nutrientes en las aguas superficiales disminuya debido al aumento de la estratificación.

4.1.6 *Intercambios atmósfera-océano y tierra-océanos*

- El cambio de uso de la tierra se traduce en considerables repercusiones hidrológicas en la producción del ecosistema, en particular en la carga sólida, los flujos hídricos (debido a la construcción de embalses), y consecuencias físico-químicas (hipoxia, estratificación y salinidad). No es posible sacar conclusiones generales acerca de los efectos de estos procesos; pero se sabe que impactan en la composición de las comunidades, en los procesos productivos y estacionales del plancton y en las poblaciones de peces.
- Los cambios mencionados someterán a presión adicional los sistemas de producción de alimentos pesqueros continentales y terrestres (p. ej., el arroz), en particular en los países en desarrollo.

4.1.7 *Pautas de variabilidad climática de baja frecuencia*

- Algunos estudios indican una intensificación y un aumento de la frecuencia de determinados fenómenos atmosféricos (p. ej., la oscilación del Atlántico norte, la oscilación meridional El Niño), pero los modelos climáticos predicen en general que, en combinación con una variabilidad decádica continuada y similar a la registrada durante el siglo XX, su tendencia espacial mostrará bastante uniformidad a través de las cuencas oceánicas.
- En el seno de determinadas cuencas oceánicas, las pautas de los fenómenos atmosféricos pueden manifestar fuertes teleconexiones, pero las teleconexiones entre cuencas y el potencial sincronismo biológico producido por la acción del clima a lo largo de varias décadas son normalmente mucho más débiles.

4.2 **Efectos observados de la variabilidad y el cambio climático en los procesos ecosistémicos y en la producción pesquera**

4.2.1 *Resumen de los procesos fisiológicos, de desove y de reclutamiento susceptibles a la variabilidad climática*

- Los organismos están adaptados a un ámbito específico de condiciones ambientales dentro del cual su funcionamiento es óptimo. El comportamiento fisiológico, que a menudo se relaciona con la demanda metabólica de oxígeno por los tejidos, puede degradarse y causar estrés aun en condiciones (p. ej., a temperaturas) consideradas por debajo de los límites letales.

4.2.2 *Producción primaria*

- Las observaciones satelitales indican que, entre comienzos del decenio de 1980 y finales del de 1990, ha habido una reducción de 6 por ciento en la productividad primaria oceánica mundial, pero con diferencias regionales muy acentuadas. Por ejemplo, en las altas latitudes los índices de clorofila han aumentado durante los últimos 20 años; y seguidamente ha habido un cambio en la dominancia relativa de las diatomeas respecto al fitoplancton pequeño.
- Es probable que a causa del aumento de la estratificación vertical y de la estabilización de la columna de agua en los océanos y lagos se reduzca la disponibilidad de nutrientes en las zonas fóticas; y que por consiguiente, en un mundo que se habrá vuelto más caliente, la producción primaria y secundaria disminuya. Sin embargo, en las altas latitudes el tiempo de residencia de las partículas en la zona fótica aumentará; esto determinará el prolongamiento de la

temporada de crecimiento y el aumento de la producción primaria. En general, se espera un leve incremento de la producción primaria mundial, con muy pronunciadas diferencias regionales.

- El calentamiento climático debería ocasionar una contracción del muy productivo bioma marginal de los hielos marinos y del giro subtropical estacionalmente estratificado, y una expansión del bioma subtropical estratificado permanente de baja productividad y del bioma del giro subpolar.
- Las simulaciones indican que bajo condiciones de calentamiento mundial, el comienzo de la floración de las diatomeas en primavera podría retrasarse y que su biomasa máxima podría reducirse. Es posible que haya cambios en el grupo de fitoplancton dominante.
- En términos generales, en los lagos situados en zonas de alta latitud o de alta altitud, el calentamiento atmosférico acarrea una reducción de la cubierta de hielo, temperaturas del agua más altas, una temporada de crecimiento prolongada y, consecuentemente, un aumento de la abundancia de algas y de productividad. En contraste, en algunos lagos tropicales profundos se está observando una reducción de la abundancia de algas y una disminución de la productividad, atribuibles probablemente a un menor reabastecimiento de nutrientes.
- Se espera que la intensificación de los ciclos hidrológicos influya substancialmente en los procesos limnológicos. En general, la productividad en todos los niveles (del plancton a los peces) puede verse estimulada por el aumento de la escorrentía, de las tasas de descarga, de la superficie inundable y del nivel del agua durante la estación seca. Los desajustes cronológicos pueden determinar que la producción se dispare en el momento equivocado y que los procesos productivos se desarrollen fuera de la zona habitual de su hábitat.

4.2.3 *Producción secundaria*

- No se tienen evaluaciones mundiales acerca de las repercusiones potenciales del cambio climático en la producción oceánica secundaria. Pese a que se trata de un campo muy investigado (véase p. ej. Mackas y Beaugrand, 2008), los resultados de los estudios tienden a estar marcados predominantemente por las condiciones locales y regionales.
- Sin embargo, los resultados regionales sugieren que los efectos del cambio climático pueden ser más evidentes en la estructura de las comunidades zooplanctónicas que en la biomasa total de éstas.

4.2.4 *Cambios en la distribución*

- Se espera que a causa del cambio climático la mayor parte de las especies se desplace hacia los polos, que se expanda el área de distribución de las especies de aguas cálidas y se contraiga el de las de aguas más frías.
- Las observaciones sobre los cambios distributivos, consistentes con lo anterior, se han hecho, entre otros lugares, en el mar del Norte, el Atlántico septentrional y las costas este y oeste de América del Norte respecto a los copépodos, invertebrados demersales, organismos inter-mareales y especies de peces. En las comunidades de peces, los cambios más rápidos son los que ocurren en las especies pelágicas; éstos consisten en movimientos verticales para contrarrestar el calentamiento de las aguas superficiales.
- Los períodos migratorios de muchos animales han seguido las tendencias decádicas de la temperatura de los océanos, registrando retrasos durante las décadas frías y adelantos, de hasta dos meses, durante los años cálidos.

4.2.5 *Cambios en la abundancia*

- Las poblaciones que se encuentran en los puntos polares extremos de sus áreas de distribución tienden a aumentar en abundancia en consonancia con el alza de las

temperaturas, mientras que las poblaciones que están en las partes más cercanas al ecuador de sus áreas de distribución tienden a declinar en abundancia a medida que las temperaturas suben.

- El aumento en la tasa de crecimiento en respuesta a la subida de la temperatura sólo ocurre cuando la disponibilidad de alimento es adecuado para satisfacer la mayor demanda alimentaria.

4.2.6 Cambios fenológicos

- Más del 50 por ciento de todas las especies terrestres, dulceacuícolas o marinas estudiadas han exhibido cambios fenológicos medibles a lo largo de los últimos 20 a 140 años. Estos cambios concordaban sistemática y predominantemente con la dirección que se esperaba que adoptase el cambio climático en las distintas regiones.
- Las observaciones realizadas en el mar del Norte indican que la estructura de las comunidades planctónicas está cambiando: los dinoflagelados alcanzan su máximo estacional anticipadamente en respuesta al calentamiento, mientras que las diatomeas no han mostrado un patrón coherente de cambio porque su reproducción está determinada principalmente por el aumento de la intensidad luminosa.
- Las observaciones realizadas en muchos lagos de Europa y América del Norte indican que, debido al calentamiento, la proliferación del fitoplancton en primavera se ha adelantado; pero que el zooplancton no ha respondido de manera análoga y que su población está disminuyendo porque los procesos de emergencia zooplanctónica ya no corresponden a la alta abundancia de algas. Preocupa el hecho de que la trofodinámica de los ambientes marinos y de aguas dulces, posiblemente ya alterada radicalmente por el calentamiento del océano, esté sufriendo los efectos de un desfase entre el depredador y su presa.

4.2.7 Invasiones de especies y enfermedades

- Existen pocas pruebas que apoyen la suposición de que el aumento de los brotes de enfermedades pueda estar vinculado con el calentamiento mundial, aunque se ha observado que los patógenos se propagan por zonas de latitudes más altas.
- La proliferación de algas nocivas parece haberse vuelto más común, pero no está claro si está causada por el cambio climático. El cambio esperado en la relación diatomeas-dinoflagelados en un océano que se está calentando también puede jugar un papel en este fenómeno.
- Los riesgos de extinción de especies a causa del cambio climático son posibles, pero no se conocen aún ejemplos que los confirmen. Se darán casos de adaptaciones evolutivas, aunque en escalas temporales y con características que pueden depender de cada especie.

4.2.8 Repercusiones en la cadena trófica, desde el zooplancton hasta los peces

- Es probable que el cambio climático afecte a las especies y a los ecosistemas a través de procesos tanto directos como indirectos relacionados con la cadena trófica. La predominancia en la cadena trófica de procesos directos o indirectos dependerá de si éstos están estructurados de forma descendente, de forma ascendente o desde el centro. Se ha insinuado que el control ecosistémico se correlaciona con la riqueza de especies y con la temperatura.

4.2.9 Cambios de régimen y otros acontecimientos ecosistémicos extremos

- Se reconoce cada vez más que uno de los mecanismos mediante los cuales interactúan la variabilidad climática y el cambio climático en la dinámica del ecosistema son los «cambios de régimen» no lineales. La capacidad amplificadora de las señales climáticas de los ecosistemas sugiere que los cambios climáticos

graduales (o incluso estocásticos) pueden provocar respuestas biológicas repentinas e incluso impredecibles conforme los ecosistemas pasan de un estado a otro.

- Se han observado cambios de régimen en el océano Atlántico septentrional y en el océano Pacífico septentrional, entre otros océanos, que afectan a la productividad y a la dominancia de las especies en los dominios pelágico y demersal.

4.3 Hipótesis de las repercusiones del cambio climático en la producción pesquera y en los ecosistemas

- Es posible predecir, en ciertos casos con un elevado nivel de confianza, las repercusiones generales en los sistemas marinos y acuáticos producidas por los cambios en gran escala relacionados con la temperatura, el régimen de vientos y la acidificación.
- A escalas temporales «rápidas» (unos pocos años), se puede predecir con un alto nivel de confianza que el aumento de la temperatura tendrá efectos negativos en la fisiología de los peces debido a que el transporte de oxígeno a los tejidos se reduce cuando la temperatura aumenta. Esta limitación fisiológica se traducirá probablemente en limitaciones importantes para la acuicultura. Las restricciones fisiológicas determinarán cambios en la distribución tanto de las especies de agua dulce como marinas, y ocasionarán posibles cambios en la abundancia ya que los procesos de reclutamiento sufrirán deterioro. Se espera que ocurran alteraciones en la cronología de los acontecimientos relacionados con el ciclo biológico debidas al cambio climático (nivel de confianza alto). Las especies de vida corta y de tasas rápidas de rotación, por ejemplo el plancton, las jibias y los pequeños peces pelágicos serán los que con mayor probabilidad sufrirán estos cambios.
- A escalas temporales intermedias (unos pocos años a una década), los factores de estrés fisiológico y los cambios fenológicos inducidos por la temperatura tendrán repercusiones en los procesos de reclutamiento y por consiguiente en el índice de abundancia de muchas poblaciones marinas y acuáticas (nivel de confianza alto). Es probable que estos efectos se manifiesten también de forma más aguda en los extremos de los ámbitos de distribución de las especies y para las especies menos longevas. Los cambios en la abundancia alterarán la composición de las comunidades marinas y acuáticas, y tendrán posibles consecuencias en la estructura y productividad de estos ecosistemas marinos. La predicción de las repercusiones netas en la comunidad (p. ej., la biomasa total o la productividad) tiene un nivel de confianza intermedio debido a que en los grupos funcionales intervienen dinámicas de compensación. En muchas zonas se pronostica un aumento de la estratificación vertical, que causará una reducción de la mezcla vertical y una disminución de los índices de productividad (nivel de confianza intermedio). Este factor determinará cambios en la composición de las especies.
- A escalas temporales largas (varias décadas), las repercusiones pronosticadas dependen de los cambios que ocurran en la producción primaria en los océanos y su transferencia a niveles tróficos superiores. Los modelos muestran una gran variabilidad en los resultados de estos cambios, de modo que las predicciones tienen un nivel de confianza bajo. Las predicciones regionales pueden tener un nivel de fiabilidad más alto porque el conocimiento de los procesos específicos involucrados es mayor. La mayoría de los modelos muestra una disminución de la producción primaria y cambios en la composición del fitoplancton que afectarán a los organismos más pequeños, aunque con una gran variabilidad regional.
- Sigue habiendo gran incertidumbre y lagunas en las investigaciones, en particular en cuanto a los efectos de las interacciones sinérgicas entre diversos factores de estrés, la extrapolación de datos más allá de las condiciones históricas, la reducción de la capacidad de recuperación del ecosistema ante la variabilidad climática como consecuencia de los cambios ocasionados por la pesca, la localización y

funciones de los umbrales críticos, y la capacidad de adaptación y evolución de los organismos marinos y acuáticos en respuesta a estos cambios.

- En lo que respecta a los sistemas de agua dulce, son motivo de especial preocupación los cambios en la incidencia cronológica, intensidad y duración de las inundaciones, aspectos a los que muchas especies de peces, en respuesta al cambio climático, han adaptado sus períodos migratorios, de desove y de transporte de gametos. En el contexto del cambio climático, y en particular en los países en desarrollo, es importante diseñar sistemas de ordenación capaces de satisfacer las necesidades de agua dulce de los peces y de los sistemas de producción de alimentos terrestres (p. ej., de arroz).

Se espera que las respuestas anticipadas de los ecosistemas regionales al cambio climático comprendan:

Ártico

Cambios físicos:

- un aumento de 5 °C de la temperatura del aire;
- un aumento de 6 por ciento de las precipitaciones;
- una subida de 15 cm del nivel del mar;
- un aumento de 5 por ciento de la cubierta nubosa;
- una reducción de 20 días del período de duración del hielo marino;
- una reducción de 20 por ciento del hielo invernal con importantes zonas libres de hielo en verano.

Consecuencias ecológicas:

- un aumento de dos a cinco veces de la producción primaria respecto a las condiciones actuales;
- una reducción del ámbito de distribución de los peces de aguas frías y de las especies bentónicas, pero una expansión hacia el norte del ámbito de distribución de las especies del Atlántico y Pacífico;
- las especies longevas del Ártico con estrechos márgenes de tolerancia térmica y de reproducción tardía desaparecerán probablemente de los hábitats sureños;
- cambios en los períodos migratorios y aumento de las tasas de crecimiento;
- probable aumento de las especies no nativas en las aguas del Ártico;
- la extinción de las actuales especies de peces del Ártico es improbable.

Atlántico septentrional, Atlántico nororiental

Cambios físicos:

- las repercusiones futuras derivadas del cambio climático en el Atlántico septentrional seguirán variando probablemente en consonancia con el estado de la oscilación del Atlántico norte;
- las temperaturas marinas en el mar del Norte, mares nórdicos y mar de Barents aumentarán probablemente en 1 a 3 °C durante los próximos 50 años, y los cambios más acentuados ocurrirán en las regiones más norteñas;
- aumento de los flujos de aguas cálidas impelidas por el viento y provenientes del Atlántico hacia las regiones norteñas mencionadas;
- aumento de la estratificación vertical;
- reducción de banquisa.

Cambios ecológicos:

- la producción primaria probablemente aumentará en el mar de Barents;
- la producción de zooplancton disminuirá probablemente conforme se reduce la producción de zooplancton en el Ártico;
- desplazamiento hacia el norte del ámbito de distribución de todas las especies;

- aumento de la producción de biomasa de las especies en las regiones ártico-boreales;
- las especies de peces que están en aguas al sur del mar del Norte aparecerán probablemente en el mar del Norte;
- las zonas de desove del capelán en el mar de Barents se desplazarán probablemente hacia el este;
- el mar del Norte estará dominado por especies pelágicas tales como el arenque y la caballa en el norte, y la sardina y la anchoa en el sur, aunque la productividad total del sistema no será muy distinta de lo que es hoy;
- se predice que el mar Báltico será un mar de aguas más templadas y de menor salinidad, con un aumento significativo de la estratificación vertical;
- en el mar Báltico, las especies tolerantes a las condiciones marinas quedarán excluidas a favor de otras especies más tolerantes de bajos índices de salinidad;
- las especies no nativas podrán penetrar en el mar Báltico, pero se espera que pocas logren colonizar debido a que no soportarán el estrés causado por la salinidad.

Atlántico noroccidental

- las predicciones sobre el ámbito de distribución y las migraciones son similares a las formuladas para el Atlántico nororiental;
- las poblaciones situadas en las zonas extremas de su ámbito de distribución serán las más afectadas;
- en algunos lugares y momentos, pueden registrarse temperaturas más bajas debido al aumento del derretimiento de los glaciares en Groenlandia. Por la acción de este fenómeno, algunas especies de aguas frías podrán encontrar lugares de refugio; pero otras, tales como el bacalao del Atlántico, podrán sufrir efectos letales a causa del frío;
- las especies adaptadas a condiciones frías y a temperaturas con escaso margen de variación, tales como el salmón del Atlántico, podrán verse extirpadas de sus hábitats normales.

Bacalao del Atlántico:

- las simulaciones sobre supervivencia del bacalao en el golfo de Maine indicaron que los índices de supervivencia de esta especie disminuían con el aumento de la temperatura, y que las temperaturas más altas contrarrestaban los aumentos de la tasa de crecimiento;
- en la mitad de la zona de distribución en el Atlántico noroccidental, el capelán (*Mallotus villosus*) es presa importante del bacalao, pero los períodos de desove del capelán se pueden retardar debido a la presencia de aguas frías provenientes del derretimiento de los glaciares;
- en el Atlántico nororiental, los modelos de simulación indican que el aumento de la temperatura en el mar del Norte reducirá las poblaciones de bacalaos.

Pacífico septentrional

- el recalentamiento antropogénico alcanzará dentro de 30 a 50 años probablemente la misma magnitud que la variabilidad climática ha alcanzado hoy;
- las relaciones clima-ecosistema-pesquerías desarrolladas durante la segunda mitad del siglo XX podrían no manifestar la misma resiliencia ante las nuevas condiciones que imperen en el siglo XXI;
- la pauta de variabilidad de la oscilación decádica del Pacífico proseguirá durante el siglo XXI, pero se añadirá a la tendencia constante al aumento de la temperatura de la superficie del mar;
- se registrarán cambios en la profundidad de la capa de mezcla (menor profundidad) y en la temperatura (aumento);

- el sistema planctónico subpolar se modificará, pasando de una fuerte variabilidad y valores mínimos en invierno a valores anuales más constantes y una productividad primaria promedio anual reducida;
- otras zonas (p. ej., las costeras) pueden ocurrir tasas de crecimiento más altas a medida que las temperaturas aumentan;
- en el Pacífico noroccidental se espera que las condiciones climáticas más cálidas alteren las pautas estacionales de producción primaria;
- en la costa occidental de América del Norte se pronostican desplazamientos de las poblaciones de peces hacia el norte;
- el salmón rojo del Pacífico puede quedar confinado al mar de Bering;
- mar de Bering: amplia retirada de los hielos, pérdidas de especies de aguas frías y aumento creciente de la abundancia de las especies provenientes del Pacífico septentrional;
- el Pacífico septentrional es susceptible a los efectos del aumento de la acidificación, y puede volverse un ambiente sub-saturado de aragonita desde la superficie hasta el fondo;
- varias especies sufren repercusiones perjudiciales debidas a las bajas concentraciones de pH.

Sistemas de surgencia costeros impulsados por el viento

- las respuestas al recalentamiento mundial de los vientos costeros que dirigen el movimiento de los ecosistemas de surgencia son contradictorias;
- el eventual aumento de la surgencia costera por estrés de viento contrarrestaría en estas regiones la tendencia mundial al aumento de la temperatura de las aguas y al incremento de la estratificación vertical;
- según otros modelos, se predice una disminución de los vientos favorables a las surgencias;
- los modelos globales de la respuesta de la producción primaria al recalentamiento han arrojado resultados contradictorios. En el Pacífico, el modelo de Sarmiento *et al.* (2004) no mostró ninguna respuesta mundial coherente a los efectos del cambio climático en las regiones en donde se producen las surgencias;
- la intensificación de la surgencia de Benguela puede aumentar el ingreso de nutrientes, la producción primaria y los eventos caracterizados por un bajo índice de oxígeno; lo mismo puede también ocurrir en otros sistemas de surgencia;
- la variabilidad local entre los sistemas es considerable, y esto dificulta la formulación de principios generales.

Mares tropicales y subtropicales

- los hábitats y biología sumamente diversificados han sido escasamente estudiados;
- queda por resolver la incógnita de si el Pacífico tropical llegará a manifestar características que lo aproximarían a una zona más afín al El Niño (reducción del gradiente este-oeste de las temperaturas en la superficie del mar) o más próximo a La Niña (aumento de dicho gradiente);
- se espera un declive de la producción primaria en el Pacífico tropical debido al aumento de la estratificación vertical y a la disminución del suministro de nutrientes;
- los efectos combinados de los cambios en la circulación, temperatura, nutrientes y producción primaria se acumulan progresivamente en la cadena trófica e influyen en la disponibilidad de presas y en las condiciones de hábitat del atún;
- las condiciones del hábitat al este de la línea del cambio de fecha podrían ser más favorables y presentar características similares a los acontecimientos de El Niño;
- para las aguas de Australia y Nueva Zelanda, las repercusiones más fuertes se advertirán probablemente en las especies costeras y en las áreas de cría submareales;

- en las especies endémicas de aguas templadas más que en las tropicales, y en las especies costeras y demersales más que en las pelágicas y de mar profundo;
- según los modelos elaborados para Australia, se predicen cambios similares a los que se producirán en otras regiones: calentamiento del océano, aumento de la estratificación vertical, intensificación de las corrientes costeras que fluyen hacia el polo, aumento de la acidificación del océano, subida del nivel del mar y alteración de los regímenes de tormentas y lluvias;
 - el calentamiento y el aumento de la estratificación alterarán la composición de las comunidades planctónicas, y modificarán su distribución en dirección al polo lo que modificará la dinámica relacionada con el período de floración, pudiendo perjudicar los procesos de transferencia de nutrientes a niveles tróficos superiores;
 - las áreas de distribución de los peces bentónicos y demersales se desplazarán hacia el sur; estas especies pueden disminuir en abundancia. Las especies pelágicas también desplazarán su distribución hacia el sur y algunas se verán favorecidas por el aumento de la surgencia local producida por el viento (p. ej., las anchoas).

Arrecifes de coral

- los arrecifes de coral corren los riesgos relacionados con las repercusiones del cambio climático, el aumento de la temperatura, la acidificación, la intensificación de las tormentas y aumento del nivel del mar, y con factores no climáticos tales como la sobreexplotación, la introducción de especies exóticas y el aumento de la carga de nutrientes y de sedimentos;
- los riesgos que pesan sobre los corales no se distribuyen homogéneamente: el aumento de la temperatura representa un problema importante para los sistemas de aguas templadas; el aumento de la acidez y la decalcificación representa un problema importante tanto para los sistemas de aguas templadas como para los de aguas frías; y las repercusiones humanas directas lo representan para las regiones más pobladas;
- se pueden definir tres escalas temporales para describir las repercusiones del cambio climático en los arrecifes de coral:
 - períodos de años: aumento de los efectos de la temperatura en el proceso de descoloramiento de los corales;
 - períodos de décadas: aumento de la acidificación y disolución de las estructuras carbonatadas de los arrecifes;
 - períodos de varias décadas: debilitamiento de la integridad estructural de los arrecifes y mayor susceptibilidad a las tormentas y los fenómenos erosivos;
- el aumento de la acidez (disminución del pH) es una amenaza poderosa y duradera para los arrecifes de coral. La capacidad de adaptación de los arrecifes a este factor de estrés ambiental es incierta: las zooxantelas simbióticas se pueden adaptar volviéndose más tolerantes a las altas temperaturas. La migración de los corales a latitudes más altas es improbable;
- en al menos un estudio se señaló que la disminución de los corales tenía repercusiones perjudiciales en la biodiversidad íctica de los arrecifes; sin embargo, hasta la fecha, existen pocas pruebas de una relación causal entre el recalentamiento del clima y el fenómeno de descoloramiento y sus repercusiones en las pesquerías costeras.

Sistemas de aguas dulces

- los lagos de agua dulce y sus ecosistemas son muy vulnerables al cambio climático;
- los registros paleográficos muestran que la forma y distribución de los lagos pueden cambiar, y que los lagos pueden desaparecer por completo debido a la alteración de las dinámicas de precipitaciones, evaporación y escorrentía;

- se pronostica que las especies de aguas frías se verán afectadas negativamente, que las de aguas templadas se verán favorecidas y que las de aguas frescas se verán favorecidas en las partes norteñas de sus áreas de distribución pero afectadas negativamente en las partes sureñas;
- en América del Norte se espera un desplazamiento general de las especies de aguas frescas y templadas hacia el norte y se considera probable en el resto del hemisferio norte;
- la respuesta de determinados ecosistemas lacustres al cambio climático depende del tamaño, profundidad y situación trófica del lago;
- según los estudios de modelación, los más afectados serían los peces de aguas frías debido a la pérdida de hábitats que afectaría a los lagos eutróficos de aguas someras;
- las condiciones de crecimiento de los peces de aguas frescas y templadas podrían mejorar en los lagos bien mezclados, en los lagos pequeños y en los lagos oligotróficos;
- la tasa de cambio de los sistemas de agua dulce frente al clima dependerá de la capacidad de las especies dulceacuícolas de «desplazarse entre ambientes», es decir de hacer uso de corredores de dispersión;
- los más afectados serán probablemente los peces de aguas de zonas bajas que carecen de corredores de dispersión hacia el norte, y las especies de aguas frías en general;
- los ecosistemas fluviales son particularmente susceptibles a los cambios en la cantidad y períodos de los flujos de agua, los cuales cambiarán probablemente en función de las alteraciones del clima;
- las iniciativas humanas orientadas a retener el agua en embalses y canales de irrigación pueden exacerbar los cambios en los flujos fluviales;
- la abundancia y diversidad de peces fluviales son especialmente susceptibles a estos factores de perturbación, ya que la disminución del nivel de las aguas durante la estación seca reduce el número de individuos capaces de desovar adecuadamente; además, muchas especies de peces se han adaptado para desovar en sincronía con el flujo de las crecidas para que sus huevos y larvas sean transportados a las zonas de cría en las zonas inundadas.

Sistemas de acuicultura

- las repercusiones directas comprenden perturbaciones en la disponibilidad de agua dulce, cambios de temperatura, variaciones del nivel del mar, y aumento de la frecuencia de acontecimientos extremos (tales como inundaciones y marejadas ciclónicas);
- los efectos indirectos incluyen repercusiones económicas, por ejemplo las relacionadas con los costos y la disponibilidad de piensos;
- las repercusiones negativas incluyen (Tabla 4):
 - las situaciones de estrés debidas a la subida de la temperatura y al aumento de la demanda de oxígeno;
 - la incertidumbre en el suministro de agua dulce;
 - los acontecimientos climáticos extremos;
 - la subida del nivel de los mares;
 - la mayor frecuencia de enfermedades y episodios de toxicidad;
 - la incertidumbre en el suministro de harina de pescado producida por la pesca de captura;
- las repercusiones positivas del cambio climático en la acuicultura incluyen el aumento de los índices de conversión alimentaria y de crecimiento en las aguas templadas, la prolongación de la temporada de crecimiento, la expansión del área de distribución de las especies hacia los polos debido a la retirada de los hielos;

- gracias al aumento de la producción primaria, los invertebrados filtradores dispondrían de mayor cantidad de alimento;
- posibles problemas relacionados con invasiones de especies exóticas, la disminución de las concentraciones de oxígeno y eventualmente una mayor floración de algas nocivas;
- las condiciones locales en las zonas de cría tradicionales pueden volverse inadecuadas para muchas especies tradicionales;
- el estrés térmico repercutirá en procesos fisiológicos tales como la demanda de oxígeno y las necesidades alimentarias;
- para que las actividades de acuicultura puedan beneficiarse del aumento de la temperatura es necesario aumentar el suministro de alimentos;
- debido a las modificaciones en la disponibilidad de agua dulce para la agricultura, la industria, las necesidades domésticas y ribereñas, y a causa de los cambios en los regímenes de precipitaciones, la acuicultura de agua dulce se volverá una actividad competidora;
- el aumento de las precipitaciones podrá también causar otros problemas, tales como inundaciones;
- la subida del nivel de los mares podría también causar inundaciones en sectores costeros, manglares y praderas marinas, que son regiones posibles abastecedoras de reservas de semillas para las especies de acuicultura.

Bibliografía

- Abell, R., Thieme, M. & Lehner, B. 2002. Ecoregion conservation for freshwater systems, with a focus on large rivers, Washington, D.C., World Wildlife Fund.
- Abraham, C.L. & Sydeman, W.J. 2004. Ocean climate, euphausiids and auklet nesting: interannual trends and variation in phenology, diet and growth of a planktivorous seabird, *Ptychorampus aleuticus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 274: 235–250.
- Agostini, V. & Bakun, A. 2002. 'Ocean triads' in the Mediterranean Sea: physical mechanisms potentially structuring reproductive habitat suitability (with example application to European anchovy, *Engraulis encrasicolus*). *Fish. Oceanogr.*, 11: 129–142.
- Ahas, R. 1999. Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *Int. J. Biometeorol.*, 42: 119–123.
- Ainley, D.G., Ballard, G., Emslie, S.D., Fraser, W.R., Wilson, P.R., Woehler, E.J., Croxall, J.P., Trathan, P.N. & Murphy, E.J. 2003. Adelie penguins and environmental change. *Science*, 300: 429–430.
- Alcamo, J., Moreno, J.M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E. & Shvidenko, A. 2007. Europe, pp. 541–580. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. Cambridge, UK, Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- Alongi, D.M. & McKinnon, A.D. 2005. The cycling and fate of terrestrially-derived sediments and nutrients in the coastal zone of the Great Barrier Reef shelf. *Mar. Pollut. Bull.*, 51: 239–252.
- Anderson, D.J. 1989. Differential responses of boobies and other seabirds in the Galapagos to the 1986–87 El Niño–Southern Oscillation event. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 52: 209–216.
- Anderson, D.M., Overpeck, J.T. & Gupta, A.K. 2002. Increase in the Asian southwest monsoon during the past four centuries. *Science*, 297: 596–599.
- Andreev, A. & Watanabe, S. 2002. Temporal changes in dissolved oxygen of the intermediate water in the subarctic North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14): 1680, doi:10.1029/2002GL015021.
- Antonov, J. I., Levitus, S. & Boyer, T.P. 2002. Steric sea level variations during 1957–1994: Importance of salinity. *J. Geophys. Res.*, 107(C12): 8013, doi:10.1029/2001JC000964).
- Arthington, A.H., Lorenzen, K., Pusey, B.J., Abell, R., Halls, A., Winemiller, K.O., Arrington D.A. & Baran, E. 2003. River fisheries: ecological basis for management and conservation. In R.L. Welcomme, ed. Rome, *Proceedings of the 2nd International Large Rivers Symposium*, FAO.
- Astthorsson, O.S. & Gislason, A. 1995. Long-term changes in zooplankton biomass in Icelandic waters in spring. *ICES J. Mar. Sci.*, 52: 657–68.
- Atkinson, A.A., Siegel, V., Pakhomov, E. & Rothery, P. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432: 100–103.
- Attrill, M.J., Wright, J. & Edwards, M. 2007. Climate-related increases in jellyfish frequency suggests a more gelatinous future for the North Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 52: 480–485.
- Auad, G., Miller, A. & Di Lorenzo, E. 2006. Long-term forecast of oceanic conditions off California and their biological implications, *J. Geophys. Res.*, 111, C09008, doi:10.1029/2005JC003219.
- Austin, J., Butchart, N. & Shine, K.P. 1992. Possibility of an Arctic ozone hole in a doubled- CO₂ climate. *Nature*, 360: 221–225.
- Baker, A.C. 2001. Ecosystems – reef corals bleach to survive change. *Nature*, 411: 765–766.

- Bakun, A.** 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247: 198–201.
- Bakun, A.** 1996. Patterns in the ocean. Ocean processes and marine population dynamics. California, *California Sea Grant College System*, p. 323.
- Bakun, A. & Weeks, S.J.** 2004. Greenhouse gas buildup, sardines, submarine eruptions and the possibility of abrupt degradation of intense marine upwelling ecosystems. *Ecol. Lett.*, 7: 1015–1023.
- Barbraud, C. & Weimerskirch, H.** 2001. Emperor penguins and climate change. *Nature*, 411(6834): 183–186.
- Barnston, A.G. & Livezey, R. E.** 1987. Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.*, 115: 1083–1126.
- Barth, J.A., Menge, B.A., Lubchenco, J., Chan, F., Bane, J.M., Kirincich, A.R., McManus, M.A., Nielsen, K.J., Pierce, S.D. & Washburn, L.** 2007. Delayed upwelling alters nearshore coastal ocean ecosystems in the northern California current. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104: 3719–3724.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. & Palutikof, J.P. (eds).** 2008. *Climate change and water*. Technical paper of the IPCC, IPCC Secretariat, Geneva. 210pp.
- Battarbee, R.W., Grytnes, J.A., Thompson, R., Appleby, P.G., Catalan, J., Korhola, A., Birks, H.J.B., Heegaard, E. & Lami, A.** 2002. Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. *J. Paleolimnol.*, 28: 161–179.
- Beamish, R.J., McFarlane G.A. & Benson, A.** 2006. Longevity overfishing. *Progr. Oceanogr.*, 68: 289–302.
- Beamish, R.J., McFarlane, G.A. & King, J.R.** 2000. Fisheries climatology: understanding the interannual and decadal scale processes that regulate British Columbia fish populations naturally, p. 94–139. In T. Parsons & P. Harrison, eds. *Fisheries oceanography: an integrative approach to fisheries ecology and management*. Oxford, UK, Blackwell Science Ltd.
- Beamish, R.J., Noakes, D.J., McFarlane, G.A., Klyashtorin, L., Ivanov, V.V. & Kurashov, V.** 1999. The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56(3): 516–526.
- Beare, D. J., Burns, F., Peach, K., Portilla, E., Greig, A., Mckenzie, E. & Reid, D. G.** 2004. An increase in the abundance of anchovies and sardines in the north western North Sea since 1995. *Glob. Change. Biol.*, 10: 1209–1213.
- Beaugrand, G.** 2003. Long-term changes in copepod abundance and diversity in the north-east Atlantic in relation to fluctuations in the hydroclimatic environment. *Fisher. Oceanogr.*, 12(4-5): 270–283.
- Beaugrand, G.** 2004. The North Sea regime shift: evidence, causes, mechanisms and consequences. *Prog. Oceanogr.*, 60: 245–262.
- Beaugrand, G. & Ibáñez, F.** 2004. Monitoring marine plankton ecosystems (2): long-term changes in North Sea calanoid copepods in relation to hydro-meteorological variability. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 284: 35–47.
- Beaugrand, G. & Reid, P.C.** 2003. Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Glob. Change Biol.*, 9(6): 801–817.
- Beaugrand, G., Brander, K.M., Lindley, J.A., Souissi, S. & Reid, P.C.** 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature*, 426: 661–664.
- Beaugrand, G., Edwards, M., Brander, K., Luczak, C. & Ibáñez, F.** 2008. Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecol. Letters* 11 doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01218.x.
- Beaugrand, G., Reid, P.C., Ibáñez, F., Lindley, J. A. & Edwards M.** 2002. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, 296: 1692–1694.
- Behrenfeld, M.J. & Falkowski, I.G.** 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentrations. *Limnol. Oceanogr.*, 42: 1–20.

- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, R.M. & Boss, E.S. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752–755.
- Beltrami, H., Smerdon, J.E., Pollack, H.N. & Huang, S. 2002: Continental heat gain in the global climate system. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2001GL014310.
- Benson, A.J. & Trites, A.W. 2002. Ecological effects of regime shifts in the Bering Sea and the eastern North Pacific Ocean. *Fish and Fisher.*, 3: 95–113.
- Berge, J., Johnsen, F., Nilsen, F., Gulliksen, B. & Slagstad, D. 2005. Ocean temperature oscillations enable reappearance of blue mussels *Mytilus edulis* in Svalbard after a 1 000 year absence. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 303: 167–175.
- Berteaux, D., Réale, D., McAdam, A.G. & Boutin, S. 2004. Keeping pace with fast climate change: can Arctic life count on evolution? *Integr. Comp. Biol.*, 44: 140–151.
- Bertness, M.D. & Ewanchuk, P.J. 2002. Latitudinal and climate driven variation in the strength of salt marsh plant competition and facilitation. *Oecologia*, 132: 392–401.
- Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D. & Unnikrishnan, A. 2007. Observations: Oceanic climate change and sea level. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds. *Climate Change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.
- Bonnet, D., Richardson, A.J., Harris, R., Hirst, A., Beaugrand, G., Edwards, M., Ceballos, S., Diekman, R., López-Urrutia, A., Valdes, L., Carlotti, F., Molinero, J.C., Weikert, H., Greve, W., Lucic, D., Albaina, A., Yahia, N.D., Umani, S.F., Miranda, A., dos Santos, A., Cook, K., Robinson, S. & Fernandez de Puellas, M.L. 2005. An overview of *Calanus helgolandicus* ecology in European waters. *Progr. Oceanogr.*, 65: 1–53.
- Bopp, L., Aumont, O., Cadule, P., Alvain, S. & Gehlen, M. 2005. Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19606, doi:10.1029/2005GL023653.
- Boyd, P.W. & Doney, S.C. 2002. Modelling regional responses by marine pelagic ecosystems to global climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 29(16): 1806, doi:10.1029/2001GL014130.
- Boyer, T.P., Levitus, S., Antonov, J.I., Locarnini, R.A. & Garcia, H.E. 2005. Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955–1998. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01604, doi:10.1029/2004GL021791.
- Brander, K. 1994. Patterns of distribution, spawning, and growth in North Atlantic cod: the utility of inter-regional comparisons. *ICES mar. Sci. Symp.*, 198: 406–413.
- Brander, K. 2007. Global fish production and climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104: 19709–19714.
- Brander, K., Blom, G., Borges, M.F., Erzini, K., Henderson, G., MacKenzie, B.R., Mendes, H., Ribiero, J., Santos, A.M.P. & Toresen, R. 2003. Change in fish distribution in the eastern North Atlantic: are we seeing a coherent response to changing temperature? *ICES Mar. Sci. Symp.*, 219: 261–270.
- Brodeur, R.D., Sugisaki, H. & Hunt, G.L., Jr. 2002. Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 233: 89–103.
- Brunel, T. & Boucher, J. 2006. Pattern of recruitment variability in the geographical range of the exploited North East Atlantic fish species. *J. Sea Res.*, 55: 156–168.
- Bryden, H.L., Longworth, H.R. & Cunningham, S.A. 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 °N. *Nature*, 438: 655–657.
- Buddemeier, R.W., Kleypas, J.A. & Aronson, R.B. 2004. Coral reefs and global climate change. Potential contributions of climate change to stresses on coral reefs ecosystems. Arlington, VA. Pew Center for Global Climate Change. 42 pp. (Available at www.pewclimate.org.)

- Caldeira, K. & Wickett, M.E. 2005. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J. Geophys. Res.*, 110, C09S04, doi:10.1029/2004JC002671.
- Cane, M.A. 2005. The evolution of El Niño, past and future. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 230: 227–240.
- Carlsson, P., Graneli, E., Tester, P. & Boni, L. 1995. Influences of riverine humic substances on bacteria, protozoa, phytoplankton, and copepods in a coastal plankton community. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 127: 213–221.
- Carlton, J.T. 2000. Global change and biological invasions in the oceans. In H.A. Mooney & R.J. Hobbs, eds. *Invasive species in a changing world*, pp.31–53. Covelo, CA, Island Press.
- Carpenter, S.R. 2003. Regime shifts in lake ecosystems: pattern and variation. Vol. 15 in the Excellence in ecology series, Germany, Ecology Institute, Oldendorf/Luhe.
- Carvalho, L. & Kirika, A. 2003. Changes in shallow lake functioning: response to climate change and nutrient reduction. *Hydrobiologia*, 506: 789–796.
- Chan, F., Barth, J.A., Lubchenco, J., Kirincich, A., Weeks, H., Peterson, W.T. & Menge, B.A. 2008. Emergence of anoxia in the California Current large marine ecosystem. *Science*, 319: 920.
- Chassignet, E.P., Hurlburt, H.E., Smedstad, O.M., Halliwell, G.R., Wallcraft, A.J., Metzger, E.J., Blanton, B.O., Lozano, C., Rao, D.B., Hogan, P.J. & Srinivasan A. 2006. Generalized vertical coordinates for eddy-resolving global and coastal ocean forecasts. *Oceanogr.*, 19: 20–31.
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E. & Niquen, M. 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299: 217–221.
- Checkley, D.M., Ayon, P., Baumgartner, T., Bernal, M., Coetzee, J.C., Emmett, R., Guevara, R., Hutchings, L., Ibaibarriaga, L., Nakata, H., Oozeki, Y., Planque, B., Schweigert, J., Stratoudakis, Y. & van der Lingen, C. 2009. Habitats of small pelagic fish. In D. Checkley, C. Roy, J. Alheit, & Y. Oozeki, eds. *Climate change and small pelagic fish*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Cheung, W.W.L., Close, C., Lam, V., Watson, R. & Pauly, D. 2008. Application of macroecological theory to predict effects of climate change on global fisheries potential. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 365: 187–197.
- Chiba, S., Ono, T., Tadokoro, K., Midorikawa, T. & Saino, T. 2004. Increased stratification and decreased lower trophic level productivity in the Oyashio region of the North Pacific: a 30-year retrospective study. *J. Oceanogr.*, 60: 149–162.
- Childers, D.L., Day, J.W. & Muller, R.A. 1990. Relating climatological forcing to coastal water levels in Louisiana estuaries and the potential importance of El Niño Southern Oscillation events. *Clim. Res.*, 1: 31–42.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. & Whetton, P. 2007. Regional climate projections. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.
- Church, J.A., White, N.J., Coleman, R., Lambeck, K. & Mitrovica, J.X. 2004. Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period. *J. Clim.*, 17: 2609–2625.
- Ciannelli, L., Hjermmann, D.Ø., Lehodey, P., Ottersen, G., Duffy-Anderson, J.T. & Stenseth, N.C. 2005. Climate forcing, food web structure, and community dynamics in pelagic marine ecosystems. In A. Belgrano, U.M. Scharler, J. Dunne, R.E. Ulanowicz, eds. *Aquatic food webs: an ecosystem approach*, p. 143–169. Oxford, UK, Oxford University Press.

- Clark, B.M. 2006. Climate change: a looming challenge for fisheries management in southern Africa. *Mar. Policy*, 30: 84–95.
- Clark, R.A., Fox, C.J., Viner, D. & Livermore, M. 2003. North Sea cod and climate change – modelling the effects of temperature on population dynamics. *Glob. Change Biol.*, 9: 1669–1680.
- Clark, R.A. & Frid, C.L.J. 2001. Long-term changes in the North Sea ecosystem. *Environm. Rev.*, 9: 131–187.
- Clark, W.G. & Hare, S.R. 2002. Effects of climate and stock size on recruitment and growth of Pacific halibut. *N. Amer. J. Fisher. Manag.*, 22: 852–862.
- Clemmensen, C., Potrykus, A. & Schmidt, J. 2007. *Climate change and European fisheries*. European Parliament, policy department, structural and cohesion policies, fisheries. Brussels. Study IP/B/PECH/IC/2006–199.
- Coe, M.T. & Foley, J.A. 2001. Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad basin. *J. Geophys. Res.*, 106: 3349–3356.
- Cohen, J. & Barlow, M. 2005. The NAO, the AO and global warming: how closely related? *J. Climate*, 18: 2298–4513.
- Collie, J.S., Richardson, K. & Steele, J.H. 2004. Regime shifts: can ecological theory illuminate the mechanisms? *Progr. Oceanogr.*, 60: 281–302.
- Cox, P., Betts, R., Jones, C., Spall, S. & Totterdell, I. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408: 184–187.
- Cropp, R. & Gabrica, A. 2002. Ecosystem adaptation: do ecosystems maximize resilience? *Ecology*, 83: 2019–2026.
- Croxall, J.P., Trathan, P.N. & Murphy, E.J. 2002. Environmental change and Antarctic seabird populations. *Science*, 297: 1510–1514.
- Crozier, L.G., Hendry, A.P., Lawson, P.W., Quinn, T.P., Mantua, N.J., Battin, J., Shaw, R.G. & Huey, R.B. 2008. Potential responses to climate change in organisms with complex life histories: evolution and plasticity in Pacific salmon. *Evol. Applic.*, 1: 252–270.
- Cruz, J.B. & Cruz, F. 1990. Effect of El Niño Southern Oscillation conditions on nestling growth rate in the dark-rumped petrel. *Condor*, 92 : 160–165.
- Cruz, R.V., Harasawa, H., Lal, M., Wu, S., Anokhin, Y., Punsalmaa, B., Honda, Y., Safari, M., Li, C. & Huu Ninh, N. 2007. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. *Impacts, adaptation and vulnerability*, Asia p. 469-506. Contribution of Working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Csirke, J., Guevara-Carrasco, R., Cárdenas, G., Niquen, M. & Chipollini, A. 1996. Situación de los recursos anchoveta (*Engraulis ringens*) y Sardina (*Sardinops sagax*) a principios de 1994 y perspectivas para la pesca en el Perú, con particular referencia a las regiones norte y centro de la costa peruana. *Bol. Inst. Mar Perú*, 15: 3–23.
- Cubash, U., Meehl, G.A., Boer, G.J., Stouffer, R.J., Dix, M., Noda, A., Senior, C.A., Raper, S. & Yap, K.S. 2001. Projections of future climate change. Chapter 9. In J. T. Houghton, Ding Yihui and M. Noguer eds. *Climate Change 2001. The scientific basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Curry, R. & Mauritzen, C. 2005. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science*, 308: 1772–1774.
- Cury, P., Bakun, A., Crawford, R. J.M., Jarre, A., Quiñones, R. A., Shannon, L.J. & Verheye, H.M. 2000. Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems. *ICES J. Mar. Sci.*, 57: 603–618.
- Cury, P. & Roy, C. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46: 670–680.
- Cury, P. & Shannon, L.J. 2004. Regime shifts in the Benguela Ecosystem: facts, theories, and hypothesis. *Progr. Oceanogr.*, 60: 223–243.

- Cushing, D.H. 1969. The regularity of the spawning season of some fishes. *ICES J. Mar. Sci.*, 33: 81–92.
- Cushing, D.H. 1982. *Climate and fisheries*. New York, USA, Academic Press.
- Cushing, D.H. 1990. Plankton production and yearclass strength in fish populations- an update of the match-mismatch hypothesis. *Adv. Mar. Biol.*, 26: 249–293.
- Dale, B. 2001. The sedimentary record of dinoflagellate cysts: Looking back into the future of phytoplankton blooms. *Sc. Mar.*, 65: 257–272.
- Daskalov, G. 2002. Overfishing drives a trophic cascade in the Black Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 225: 53–63.
- Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P.L., Wofsy, S.C. & Zhang, X. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds. *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.
- Delworth, T. L. & Dixon, K.W. 2000. Implications of the recent trend in the Arctic/North Atlantic Oscillation for the North Atlantic thermohaline circulation. *J. Clim.*, 13(21): 3721–3727.
- de Roos, A.M., Boukal, D.S. & Persson, L. 2006. Evolutionary regime shifts in age and size at maturation of exploited fish stocks. *Proc. Royal Soc. Lond., B* 273(1596): 1873–1880.
- De Silva, S.S. & Soto, D. 2009. Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation. In K. Cochrane, C. De Young, D. Soto and T. Bahri (eds). *Climate change implications for fisheries and aquaculture. Overview of current scientific knowledge. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 530. Rome. FAO. pp. 151–212.
- De Wit, M. & Stankiewicz, J. 2006. Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science*, 311: 1917–1921.
- deYoung, B., Barange, M., Beaugrand, G., Harris, R., Perry, R.I., Scheffer, M. & Werner, F. 2008. Regime shifts in marine ecosystems: detection, prediction and management. *Trends Ecol. Evol.*, 23(7): 402–409.
- deYoung, B., Harris, R., Alheit, J., Beaugrand, G., Mantua, N. & Shannon, L. J. 2004. Detecting regime shifts in the ocean: data considerations. *Progr. Oceanogr.*, 60: 143–164.
- Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S-A. & Lee, A.J. 1988. The “Great Salinity Anomaly” in the North Atlantic, 1968–1982. *Progr. Oceanogr.*, 20: 103–151.
- Diffenbaugh, N.S., Snyder, M.A. & Sloan, L.C. 2004. Could CO₂-induced land-cover feedbacks alter near-shore upwelling regimes? *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101: 27–32.
- Dixon, P.J., Sultana, P., Halls, A.S. & Lorenzen, K. 2003. Understanding livelihoods dependent on inland fisheries in Bangladesh and Southeast Asia. DFID/FMSP project R8118. Department for International Development, UK.
- Domingues, C.M., Church, J.A., White, N.J., Gleckler, P.J., Wijffels, S.E., Barker, P.M. & Dunn, J.R. 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 453: 1090–1093.
- Doney, S.C. 2006. Plankton in a warmer world. *Nature*, 444: 695–696.
- Donner, S.D., Skirving, W.J., Little, C.M., Oppenheimer, M. & Hoegh-Guldberg, O. 2005. Global assessment of coral bleaching and required states of adaptation under climate change. *Glob. Change Biol.*, 11: 2251–2265.
- Douglas, B.C. 2001. Sea level change in the era of the recording tide gauge. In B.C. Douglas, M.S. Kearney & S.P. Leatherman, eds. *Sea level rise*, pp. 37–64. San Diego, Academic Press.
- Drinkwater, K.F. 2000. Changes in ocean climate and its general effect on fisheries: examples from the Northwest Atlantic. In D. Mills, ed. *The Ocean Life of Atlantic Salmon: Environmental and Biological Factors Influencing Survival*, pp. 116–136. Oxford, UK, Fishing News Books, Blackwell Science.

- Drinkwater, K.F. 2005. The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1327–1337.
- Drinkwater, K.F. 2006. The regime shift of the 1920s and 1930s in the North Atlantic. *Progr. Oceanogr.*, 68: 134–151.
- Drinkwater, K., Lochman, S., Taggart, C., Thompson, K. & Frank, K. 2000. Entrainment of redfish (*Sebastes spp.*) larvae off the Scotian shelf. *ICES J., Mar. Sci.*, 57: 372–382.
- Duffy, J.E. 2003. Biodiversity loss, trophic skew and ecosystem functioning. *Ecol. Lett.*, 6: 680–687.
- Dulvy, N.K., Rogers, S.I., Jennings, S., Stelzenmüller, V., Dye, S.R. & Skjoldal, H.R. 2008. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas. *J. Appl. Ecol.* 45: 1029–1039.
- Durant, J.M., Hjermann, D.Ø., Anker-Nilssen, T., Beaugrand, G., Mysterud, A., Pettorelli, N. & Stenseth, N. 2007. Climate and the match or mismatch between predator and prey requirements and resource availability. *Clim. Res.*, 33: 271–283.
- Durant, J.M., Hjermann, D.Ø., Anker-Nilssen, T., Beaugrand, G., Mysterud, A., Pettorelli, N. & Stenseth, N.C. 2005. Timing and abundance as key mechanisms affecting trophic interactions in variable environments. *Ecol. Lett.*, 8: 952–958.
- Dutil, J.-D. & Brander, K. 2003. Comparing productivity of North American cod (*Gadus morhua*) stocks and limits to growth production. *Fish. Oceanogr.*, 12: 502–512.
- Easterling, W., Aggarwal, P., Batima, P., Brander, K., Erda, L., Howden, M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.F., Schmidhuber, S. & Tubiello, F. 2007. Food, fibre and forest products. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, & C.E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*, pp.273–313. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Edwards, M. & Richardson, A.J. 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430: 881–884.
- Edwards, M.J., Johns, D.G., Leterme, S.C., Svendsen, E. & Richardson, A.J. 2006. Regional climate change and harmful algal blooms in the North East Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 51(2): 820–829.
- Ellingsen, I.H., Dalpadado, P., Slagstad, D. & Loeng, H. 2008. Impact of climatic change on the biological production in the Barents Sea. *Clim. Change*, 87: 155–175.
- Elliott, J.M., Hurley, M.A. & Maberly, S.C. 2000. The emergence period of sea trout fry in a Lake District stream correlates with the North Atlantic Oscillation. *J. Fish Biol.*, 56: 208–210.
- Emerson, S., Watanabe, Y.W., Ono T. & Mecking, S. 2004. Temporal trends in apparent oxygen utilization in the upper pycnocline of the North Pacific: 1980–2000. *J. Oceanogr.*, 60: 139–147.
- Emslie, S.D., Fraser, W., Smith, R.C. & Walker, W. 1998. Abandoned penguin colonies and environmental change in the Palmer Station area, Anvers Island, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.*, 10: 257–268.
- Enfield, D.B. & Mestas-Nunez, A.M. 2000. Global modes of ENSO and non-ENSO SST variability and their associations with climate. In H.F. Diaz & V. Markgraf, eds. *El Niño and the Southern Oscillation: multiscale variability and global and regional impacts*, pp. 89–112. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Fabricius, K.E. 2005. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Mar. Pollut. Bull.*, 50: 125–146.
- Fabry, V.J., Seibel, B.A., Feely, R.A. & Orr, J.C. 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES J. Mar. Sci.*, 65: 414–452.
- Falkowski, P.G., Barber, R.T. & Smetacek, V. 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281: 200–206.
- FAO. 2006. *The state of world fisheries and aquaculture*. Rome, FAO: 162 pp.

- Feely, R.A., Fabry, V.J. & Guinotte, J.M. 2008. Ocean acidification of the North Pacific Ocean. *PICES Press*, 16(1): 22–26.
- Feely, R.A., Sabine, C.L., Hernandez-Ayon, J.M., Ianson, D. & Hales, B. 2008. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 320: 1490–1492.
- Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J. & Millero, F.J. 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305: 362–366.
- Ficke, A.D., Myrick, C.A. & Hansen, L.J. 2007. Potential impacts of global change on freshwater fisheries. *Rev. Fish Biol. Fisheries*, 17: 581–613.
- Field, C.B., Mortsch, L.D., Brklasich, M., Forbes, D.L., Kovacs, P., Patz, J.A., Running, S.W. & Scott, M.J. 2007. North America. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 617–652. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Fields, P.A., Graham, J.B., Rosenblatt, R.H. & Somero, G.N. 1993. Effects of expected global climate change on marine faunas. *Trends Ecol. Evol.*, 8: 361–367.
- Finney, B.P., Gregory-Eaves, I., Douglas, M.S.V. & Smol, J.P. 2002. Fisheries productivity in the North Eastern Pacific Ocean over the past 2 200 years. *Nature*, 416: 729–733.
- Flöder, S. & Burns, C.W. 2004. Phytoplankton diversity of shallow tidal lakes: Influence of periodic salinity changes on diversity and species number of a natural assemblage. *J. Phycol.* 40: 54–61.
- Fogarty, M., Incze, L., Hayhoe, K., Mountain, D. & Manning, J. 2008. Potential climate change impacts on Atlantic cod (*Gadus morhua*) off the North Eastern USA. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* DOI 10.1007/s11027–007–9131–4.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L. & Holling, C.S. 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 35: 557–581.
- Folland, C.K., Rayner, N.A., Brown, S.J., Smith, T.M., Shen, S.S., Parker, D.E., Macadam, I., Jones, P.D., Jones, R.N., Nicholls, N. & Sexton, D.M.H. 2001. Global temperature change and its major uncertainties since 1861. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2621–2624.
- Ford, S. 1996. Range extension by the oyster parasite *Perkinsus marinus* into the North Eastern United States: response to climate change? *J. Shellfish Res.*, 15: 45–56.
- Francis, R.C., Hare, S.R., Hollowed, A.B. & Wooster, W.S. 1998. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the North East Pacific. *Fish. Oceanogr.*, 7: 1–21.
- Frank, K.T., Perry, R.I. & Drinkwater, K.F. 1990. The predicted response of Northwest Atlantic invertebrate and fish stocks to CO₂ -induced climate change. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 119: 353–365.
- Frank, K.T., Petrie, B., Choi, J.S. & Leggett, W.C. 2005. Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science*, 308: 1621–1623.
- Frank, K.T., Petrie, B. & Shackell, N.L. 2007. The ups and downs of trophic control in continental shelf ecosystems. *Trends Ecol. Evol.* 22: 236–242.
- Fraser, W.R., Trivelpiece, W., Ainley, D.G. & Trivelpiece, S.G. 1992. Increases in Antarctic penguin populations: reduced competition with whales or a loss of sea ice due to environmental warming? *Polar Biol.*, 11: 525–531.
- Freeland, H., Denman, K., Wong, C.S., Whitney, F. & Jacques, R. 1997. Evidence of change in the winter mixed layer in the North East Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 44: 2117–2129.
- Fréon, P., Mullan, C. & Voisin, B. 2003. Investigating remote synchronous patterns in fisheries. *Fish. Oceanogr.*, 12: 443–457.

- Frey, K.E. & Smith, L.C. 2005. Amplified carbon release from vast west Siberian peatlands by 2100. *Geoph. Res. Lett.* 32, L09401, doi: 10.1029/2004GL02025 (2005).
- Fridriksson, A. 1948. Boreo-tended changes in the marine vertebrate fauna of Iceland during the last 25 years. *Rapp. P.-v. Reun. Conseil int. Explor. Mer*, 125: 30–32.
- Frouin R. & Lacobellis, S.F. 2002. Influence of phytoplankton on the global radiation budget, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 107, Art. No. 4377.
- Fry, F.E.J. 1971. The effect of environmental factors on the physiology of fish. In W.S. Hoar & D.J. Randall, eds. *Fish physiology*, Vol. 6. pp. 1–98. New York, USA, Academic Press.
- Fuenzalida, L., Armijo, L., Zabala, B., Hernandez, C., Rioseco, M.L., Riquelme, C. & Espejo, R.T. 2007. *Vibrio* parahaemolyticus strains isolated during investigation of the summer 2006 seafood related diarrhea outbreaks in two regions of Chile, *Int. J. Food Microbiol.*, Volume 117, Issue 3, 270–275.
- Galbraith, H., Jones, R., Park, R., Clough, J., Herrod-Julius, S., Harrington, B. & Page, G. 2002. Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitat for shorebirds. *Waterbirds*, 25: 173–183.
- Gargett, A.E. 1997. The “optimal stability window”: a mechanism underlying decadal fluctuations in North Pacific salmon stocks? *Fish. Oceanogr.*, 6: 109–117.
- Gaughan, D.J. 2002. Disease-translocation across geographic boundaries must be recognized as a risk even in the absence of disease identification: the case with Australian *Sardinops*. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 11: 113–123.
- Genner, M.J., Sims, D.W., Wearmouth, V.J., Southhall, E.J., Southward, A.J. & Hawkins, S.J. 2004. Regional climatic warming drives long-term community changes of British marine fish. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. B-Biol. Sci.*, 271: 655–661.
- Gerten, D. & Adrian, R. 2000: Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic oscillation. *Limnol. Oceanogr.*, 45: 1058–1066.
- Gerten, D. & Adrian, R. 2002: Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers. *Freshw. Biol.*, 47: 2163–2173.
- Gillett, N.P., Allan, R.J. & Ansell, T.J. 2005. Detection of external influence on sea level pressure with a multimodel ensemble. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19714, doi:10.1029/2005GL023640.
- Gillett, N.P., Graf, H.F. & Osborn, T. 2003. Climate change and the North Atlantic Oscillation. In Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottensen G., Visbeck M. (Eds.). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact* (American Geophysical Union, Washington, D.C.) pp. 193–209.
- Glynn, P.W. 1988. El Niño Southern Oscillation 1982–1983: nearshore population, community, and ecosystem responses. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 19: 309–345.
- Goes, J.I., Thoppil, P.G., Gomes, H. do R. & Fasullo, J.T. 2005. Warming of the Eurasian landmass is making the Arabian sea more productive. *Science*, 22: 545–547.
- Gonzalez-Escalona, N., Cachicas, V., Acevedo, C., Rioseco, M. L., Vergara, J. A., Cabello, F., Romero, J. & Espejo, R. T. 2005. *Vibrio parahaemolyticus* diarrhea, Chile, 1998 and 2004. *Emerg. Infect. Dis.*, 11:129–131.
- Graham, N.A., Wilson, S.K., Jennings, S., Polunin, N.V.C., Bijoux, J.P. & Robinson, J. 2006. Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 103: 8425–8429.
- Grandcourt, E.M. & Cesar, H.S.J. 2003. The bio-economic impacts of mass coral mortality on the coastal reef fisheries of the Seychelles. *Fish. Res.*, 60: 539–550.
- Greene, C.H. & Pershing, A.J. 2007. Climate drives sea change. *Science*, 315: 1084–1085.
- Gregg, W.W., Conkright, M.E., Ginoux, P., O’Reilly, J.E. & Casey, N.W. 2003. Ocean primary production and climate: global decadal changes. *Geophys. Res. Lett.* 30:1809, doi:10.1029/2003GL016889.

- Greve, W., Reiners, F., Nast, J. & Hoffmann, S. 2004. Helgoland Roads meso- and macrozooplankton time-series 1974 to 2004: lessons from 30 years of single spot, high frequency sampling at the only off-shore island of the North Sea. *Helg. Mar. Res.*, 58: 274–288.
- Greve, W., Prinage, S., Zidowitz, H., Nast, J. & Reiners, F. 2005. On the phenology of North Sea ichthyoplankton. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1216–1223.
- Gross, L. 2005. As the Antarctic Ice Pack Recedes, a Fragile Ecosystem Hangs in the Balance. *PLoS Biol.*, 3(4): e127. doi:10.1371/journal.pbio.0030127
- Hallegraeff, G.M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32: 79–99.
- Halls, A.S. & Welcomme, R.L. 2004. Dynamics of river fish populations in response to hydrological conditions: a simulation study. *River Res. Applic.*, 20: 985–1000.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J.F., Casey, K.S., Ebert, C., Fox, H.E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H.S., Madin, E.M.P., Perry, M.T., Zelig, E.R., Spalding, M., Steneck, R. & Watson, R. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319: 948–952.
- Hamilton, L., Otterstrand, O., & Ögmundardóttir, H. 2006. Rise and fall of the herring towns: impacts of climate and human teleconnections. In R. Hannesson, M. Barange & S.F. Herrick Jr. Climate change and the economics of the world's fisheries, pp. 100-125 Cheltenham, UK. Edward Elgar.
- Hampton, S.E. 2005. Increased niche differentiation between two *Conochilus* species over 33 years of climate change and food web alteration. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 421–426.
- Handisyde, N.T., Ross, L.G., Badjeck, M-C. & Allison, E.H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Final Technical Report, DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture, Stirling, U.K., 151 pp. Available at www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/pdfs/Climate_full.pdf
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D.W. & Medina-Elizade, M. 2006. Global temperature change. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 103: 14288–14293.
- Hare, S.R. & Mantua, N.J. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shift in 1977 and 1989. *Prog. Oceanogr.*, 47: 103–145.
- Harley, C.D.G., Hughes, R.A., Hultgren, K.M., Miner, B.G., Sorte, C.J.B., Thornber, C.S., Rodriguez, L.F., Tomanek, L. & Williams, S.L. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.*, 9: 228–241.
- Harris, M.P., Beare, D., Toresen, R., Nøttestad, L., Kloppmann, M., Dörner, H., Peach, K., Rushton, D.R.A., Foster-Smith, J. & Wanless, S. 2007. A major increase in snake pipefish (*Entelurus aequoreus*) in northern European seas since 2003: potential implications for seabird breeding success. *Mar Biol.*, 151: 973–983.
- Harrison, D.E. & Carson, M. 2007. Is the world ocean warming? Upper-ocean temperature trends: 1950–2000. *J. Phys. Oceanogr.*, 37: 174–187.
- Harvell, C.D., Kim, K., Burkholder, J.M., Colwell, R.R., Epstein, P.R., Grimes, D.J., Hofmann, E.E., Lipp, E.K., Osterhaus, A.D.M.E., Overstreet, R.M., Porter, J.W., Smith, G.W. & Vasta, G.R. 1999. Emerging marine diseases: climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285: 1505–1510.
- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S. & Samuel, M.D. 2002. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158–2162.
- Hashioka T. & Yamanaka, Y. 2007. Ecosystem change in the western North Pacific associated with global warming using 3D-NEMURO. *Ecol. Modell.*, 202: 95–104.
- Havenhand, J.N., Buttler, F.R., Thorndyke, M.C. & Williamson, J.E. 2008. Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin. *Current Biology*, 18: R651-R652.
- Hawkins, S.J., Southward, A.J. & Genner, M.J. 2003. Detection of environmental change in a marine ecosystem – evidence from the western English Channel. *Sci. Total Environ.*, 310: 245–256.

- Hays, G.C., Richardson, A.J. & Robinson, C. 2005. Climate change and marine plankton. *Trend. Ecol. Evol.*, 20: 337–344.
- Heath, M.R. & Lough, R.G. 2007. A synthesis of large-scale patterns in the planktonic prey of larval and juvenile cod (*Gadus morhua*). *Fish. Oceanogr.*, 16: 169–185.
- Hecky, R.E., Bootsma, H.A. & Odada, E. 2006. African lake management initiatives: the global connection. *Lakes and reservoirs: research and management* 11: pp. 203–213.
- Helaouet, P. & Beaugrand, G. 2007. Macroecology of *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus* in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 345: 147–165.
- Helmuth, B., Kingsolver, J.G. & Carrington, E. 2005. Biophysics, physiological ecology, and climate change: does mechanism matter? *Annu. Rev. Physiol.*, 67: 177–201.
- Hennessy, K., Fitzharris, B., Bates, B.C., Harvey, N., Howden, S.M., Hughes, L., Salinger, J. & Warrick, R. 2007. Australia and New Zealand. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. *Impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 507–540. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Hermann, A.J., Haidvogel, D.B., Dobbins, E.L. & Stabeno, P.J. 2002. Coupling global and regional circulation models in the coastal Gulf of Alaska. *Prog. Oceanogr.*, 53: 335–367.
- Hickel, W. 1998. Temporal variability of micro- and nanno-plankton in the German Bight in relation to hydrographic structure and nutrient changes. *ICES. J. Mar. Sci.*, 55: 600–609.
- Hilmer, M. & Lemke, P. 2000: On the decrease of Arctic sea ice volume. *Geophys. Res. Lett.*, 27(22), 3751–37
- Hirawake, T., Odate, T. & Fukuchi, M. 2005. Long-term variation of chl.a in the Southern Ocean during 1965–2002. *Geoph. Res. Lett.*, 32, L05606, doi:10.1029/2004GL021394.
- Hislop, J.R.G. 1996. Changes in North Sea gadoid stocks. *ICES J. Mar. Sci.*, 53: 1146–1156.
- Hjermann, D.Ø., Stenseth, N.C. & Ottersen, G. 2004a. Indirect climatic forcing of the Barents Sea capelin: a cohort-effect. *Mar Ecol. Progr. Ser.*, 273: 229–238.
- Hjermann, D.Ø., Stenseth, N.C. & Ottersen, G. 2004b. The population dynamics of North East Arctic cod through two decades: an analysis based on survey data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 61: 1747–1755.
- Hjermann, D.Ø., Bogstad, B., Eikeset, A.M., Ottersen, G., Gjørseter, H. & Stenseth, N.C. 2007. Food web dynamics affect North East Arctic cod recruitment. *Proc. R Soc. Lond. Ser., B* 274: pp. 661–669.
- Hobday, A.J., Okey, T.A., Poloczanska, E.S., Kunz, T.J. & Richardson, A.J., eds. 2006. Impacts of climate change on Australian marine life. Part A: executive summary. Report to the Australian Greenhouse Office, Canberra, Australia.
- Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar. Freshw. Res.*, 50: 839–866.
- Hoegh-Guldberg, O. 2005. Low coral cover in a high- CO₂ world. *J. Geoph. Res.* 110, C09S06, doi:10.1029/2004JC002528.
- Hofmann, E., Ford, S., Powell, E. & Klinck, J. 2001. Modeling studies of the effect of climate variability on MSX disease in eastern oyster (*Crassostrea virginica*) populations. *Hydrobiologia*, 460: 195–212.
- Holbrook, S.J., Schmitt, R.J. & Stephens, J.S. 1997. Changes in an assemblage of temperate reef fishes associated with a climate shift. *Ecol. Appl.*, 7: 1299–1310.
- Houde, E.D. 2001. Fish larvae. In J.H. Steele, S.A. Thorpe & K.K. Turekian, eds. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, pp. 928–938. London. Academic Press.
- Houghton, J.T., ed. 2001. Climate change 2001: The scientific basis: contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Houghton, R.W. & Visbeck, M.H. 2002. Quasi-decadal salinity fluctuations in the Labrador Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 32: 687–701.

- Hsieh, W.W. & Boer, G.J. 1992. Global climate change and ocean upwelling, *Fish. Oceanog.*, 1: 333–338.
- Hsieh, C.H., Glaser, S.M., Lucas, A.J. & Sugihara, G. 2005. Distinguishing random environmental fluctuations from ecological catastrophes for the North Pacific Ocean. *Nature*, 435: 336–340.
- Hsieh, C.H., Reiss, C.S., Hunter, J.R., Beddington, J.R., May, R.M. & Sugihara, G. 2006. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species. *Nature*, 443: 859–862.
- Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B.C., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B. & Roughgarden, J. 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929–933.
- Hunt, G.L. Jr., Stabeno, P., Walters, G., Sinclair, E., Brodeur, R.D., Napp, J.M. & Bond, N.A., 2002. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem. *Deep-Sea Res. II*. 49: 5821–5853.
- Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. 2003. The North Atlantic Oscillation: climate significance and environmental impact. Oxford, UK. Oxford University Press.
- Huse, G. & Ellingsen, I. 2008. Capelin migrations and climate change – a modelling analysis. *Clim. Change*, 87: 177–197.
- Hutchings, J.A. & Myers, R.A. 1994. Timing of cod reproduction: interannual variability and the influence of temperature. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 108: 21–31.
- International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF). 1996. Characteristics of Microbial Pathogens in Microorganism in Food 5, Blackie Academic & Professional.
- IPCC. 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Ishii, M., Kimoto, M., Sakamoto, K. & Iwasaki, S.I. 2006. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, 62: 155–170, doi:10.1007/s10872-006-0041-y.
- Isla, J.A., Lengfellner, K. & Sommer, U. 2008. Physiological response of the copepod *Pseudocalanus sp.* in the Baltic Sea at different thermal scenarios. *Glob. Change Biol.*, 14: 1–12.
- Jackson, J.B.C., Kirby, M.X., Berger, W.H., Bjorndal, K.A., Botsford, L.W., Bourque, B.J., Bradbury, R.H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J.S., Hughes, T.P., Kidwell, S., Lange, C.B., Lenihan, H.S., Pandolfi, J.M., Peterson, C.H., Steneck, R.S., Tegner, M.J. & Warner, R.R. 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293: 629–637.
- Jacobson, L.D., Bograd, S.J., Parrish, R.H., Mendelsohn, R. & Schwing, F.B. 2005. An ecosystem-based hypothesis for climatic effects on surplus production in California sardine (*Sardinops sagax*) and environmentally dependent surplus production models. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 62: 1782–1796.
- Jacquet, S. & Bratbak, G. 2003. Effects of ultraviolet radiation on marine virus-phytoplankton interactions. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 44 : 279–289.
- Jennings, S. & Brander, K. 2008. Predicting the effects of climate change on marine communities and the consequences for fisheries. *J. Mar. Syst.* (In press).
- Jennings, S. & Blanchard, J. L. 2004. Fish abundance with no fishing: predictions based on macroecological theory. *J. Anim Ecol.*, 73: 632–642.
- Jennings, S., Mélin, F., Blanchard, J.L., Forster, R.M., Dulvy N.K. & Wilson, R.W. 2008. Global-scale predictions of community and ecosystem properties from simple ecological theory. *Proc. R. Soc. B.* doi:10.1098/rspb.2008.0192.

- Jiongxin, X. 2003. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China. *Environm. Managm.*, 31: 328–341.
- Johns, D.G., Edwards, M., Richardson, A. & Spicer, J.I. 2003. Increased blooms of a dinoflagellate in the Northwest Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 265: 283–287.
- Jones, G.P., McCormick, M.I., Srinivasan, M. & Eagle, J.V. 2004. Coral decline threatens fish biodiversity in marine reserves. *Proc.Nat. Acad.Sci. USA*, 101: 8251–8253.
- Jonsson, N. & Jonsson, B. 2004. Size and age of maturity of Atlantic salmon correlate with the North Atlantic Oscillation Index (NAOI). *J. Fish Biol.*, 64: 241–247
- Jossi, J.W., John, A.W.G. & Sameoto, D. 2003. Continuous Plankton Recorder sampling off the east coast of North America: history and status. *Progr. Oceanogr.*, 58: 313–325
- Justic, D., Rabalais, N.N. & Turner, R.E. 2005. Coupling between climate variability and coastal eutrophication: evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *J. Sea Res.* 54: 25–35.
- Kang, Y.S., Kim, J.Y., Kim, H.G. & Park, J.H. 2002. Long-term changes in zooplankton and its relationship with squid, *Todarodes pacificus*, catch in Japan/East Sea. *Fish. Oceanogr.*, 11: 337–346.
- Karl, D.M. 1999. A sea of change: biogeochemical variability in the north Pacific subtropical gyre. *Ecosystems*, 2: 181–214.
- Karlsson, J., Jonsson, A. & Jansson, M. 2005. Productivity of high latitude lakes: climate effect inferred from altitude gradient. *Glob. Change Biol.*, 11: 710–715.
- Karst-Riddoch, T.L., Pisaric, M.F.J. & Smol, J.P. 2005. Diatom responses to twentieth century climate-related environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera. *J. Paleolimnol.*, 33: 265–282.
- Kawasaki, T. 1992. Mechanisms governing fluctuations in pelagic fish populations, *Afr. J. Mar. Sci.*, 12: 873–879.
- Keller, A.A. & Klein-MacPhee, G. 2000. Impact of elevated temperature on the growth survival, and trophic dynamics of winter flounder larvae: a mesocosm study. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 57: 2382–2392.
- King, J.R. ed, 2005. Report of the study group on fisheries and ecosystem responses to recent regime shifts. *PICES Scientific Report No. 28*;168 pp.
- Kirov, B. & Georgieva, K. 2002. Long-term variations and interrelations of ENSO, NOA, and solar activity. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 441–448.
- Kleypas, J.A., Buddemeier, R.W., Archer, D., Gattuso, J-P, Langdon, C. & Opdyke, B.N. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284: 118–120.
- Klyashtorin, L.B. 2001. Climate change and long-term fluctuations of commercial catches: the possibility of forecasting. FAO Fisheries Technical Paper. No. 410. Rome, FAO: 86pp.
- Knowlton, N. 2001. The future of coral reefs. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 98: 5419–5425.
- Köster, F., Hinrichsen, H.H., St John, M.A., Schnack, D., MacKenzie, B.R., Tomkiewicz, J. & Plikshs, M. 2001. Developing Baltic cod recruitment models II. Incorporation of environmental variability and species interaction. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58: 1534–1556.
- Korhola, A., Sorvari, S., Rautio, M., Appleby, P.G., Dearing, J.A., Hu, Y., Rose, N., Lami, A. & Cameron, N.G. 2002. A multi-proxy analysis of climate impacts on the recent development of subArctic Lake Saanajarvi in Finnish Lapland. *J. Paleolimnol.*, 28: 59–77.
- Kovacs, K.M. & Lydersen, C. 2008. Climate change impacts on seals and whales in the North Atlantic Arctic and adjacent shelf seas. *Science Progress*, 92: 117–150.
- Kuhlbrodt, T., Rahmstorf, S., Jaeger, C., Zickfeld, K., Bürger, G., Badeck, F., Pohl, S., Hofmann, M., Wolf-Gladrow, D., Sprengel, C., Sundby, S., Ådlandsvik, B., Vikebø, F., Tol, R. & Link, M. 2005. *Integrated assessment of changes in the thermohaline circulation – integration, deklim report*. Final symposium in Leipzig, Germany. 10 to 12 May 2005. (also available at www.pik-potsdam.de/~stefan/Projects/integration/leipzigreport.pdf)

- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Sen, Z. & Shiklomanov, I. 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences I*, 53: 3–10.
- Labat, D., Godderis, Y., Probst, J.L. & Guyot, J.L. 2004. Evidence for global runoff increases related to climate warming. *Adv. Water Resour*, 27: 631–642.
- Law, R. 2007. Fisheries-induced evolution: present status and future directions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 335: 271–277.
- Learmonth, J.A., MacLeod, C.D., Santos, M.B., Pierce, G.J., Crick, H.Q.P. & Robinson, R.A. 2006. Potential effects of climate change on marine mammals. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Revs.*, 44: 431–464.
- Lees, K., Pitois, S., Scott, C., Frid, C. & Mackinson, S. 2006. Characterising regime shifts in the marine environment. *Fish and Fisher.*, 7: 104–127.
- Legates, D.R., Lins, H.F. & McCabe, G.J. 2005. Comments on “Evidence for global runoff increase related to climate warming” by Labat *et al.* *Adv. Water Resour*, 28: 1310–1315.
- Lehodey, P. 2001. The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: dynamic spatial modelling and biological consequences of ENSO. *Progr. Oceanogr.*, 49: 439–468.
- Lehodey, P., Chai, F. & Hampton, J. 2003. Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled oceanbiogeochemical-populations dynamics model. *Fish. Oceanogr.*, 12: 483–494.
- Lehodey, P. 2004. Climate and fisheries: an insight from the central Pacific Ocean. In N.C. Stenseth, G. Ottersen, J. Hurrell, A. Belgrano, eds. *Marine ecosystems and climate variation: the North Atlantic*, pp. 137–146. Oxford. Oxford University Press.
- Lehodey, P., Alheit, J., Barange, M., Baumgartner, T., Beaugrand, G., Drinkwater, K., Fromentin, J.-M., Hare, S.R., Ottersen, G., Perry, R.I., Roy, C., van der Lingen, C.D. & Werner, F. 2006. Climate variability, fish and fisheries. *J. Climate*, 19: 5009–5030.
- Lehodey, P., Bertignac, M., Hampton, J., Lewis, T. & Picaut, J. 1997. El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*, 389: 715–718.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. & Zhang, T. 2007. Observations: changes in snow, ice and frozen ground. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA. Cambridge University Press.
- Leterme, S.C., Pingree, R.D., Skogen, M.D., Seuront, L., Reid, P.C. & Attrill, M.J. 2005. Decadal basin-scale changes in diatoms, dinoflagellates, and phytoplankton colour across the North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 1244–1253.
- Lett, C., Penven, P., Ayón, P. & Fréon, P. 2007. Enrichment, concentration and retention processes in relation to anchovy (*Engraulis ringens*) eggs and larvae distributions in the northern Humboldt upwelling ecosystem. *J. Mar. Syst.*, 64: 189–200.
- Levitus, S., Antonov, J. & Boyer, T. 2005. Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Lipp, E.K., Huq, A. & Colwell, R.R. 2002. Effects of global climate on infectious disease: the cholera model. *Clin. Microbiol. Rev.*, 15: 757–770.
- Litzow, M.A. & Ciannelli, L. 2007. Oscillating trophic control induces community reorganization in a marine ecosystem. *Ecol. Lett.*, 10: 1124–1134.
- Llope, M., Anadón, R., Viesca, L., Quevedo, M., González-Quirós, R. & Stenseth, N. 2006. Hydrography of the southern Bay of Biscay shelf-break region: integrating the multi-scale physical variability over the period 1993–2003. *J. Geophys. Res.* 111:C09021.
- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D. & Lluch-Cota, S. 2005. Changes in marine faunal distributions and ENSO events in the California Current. *Fish. Oceanogr.*, 14: 458–467.
- Loeng, H. (ed.). 2005. Marine systems. In C. Symon, ed. *Arctic climate impact assessment*, pp. 454–538. Cambridge, UK. Cambridge University Press.

- Loukos, H., Monfray, P., Bopp, L. & Lehodey, P. 2003. Potential changes in skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) habitat from a global warming scenario: modelling approach and preliminary results. *Fish. Oceanogr.*, 12: 474–482.
- Lusseau D., Williams R., Wilson B., Grellier K., Barton T.R., Hammond P.S. & Thompson P.M. 2004. Parallel influence of climate on the behaviour of Pacific killer whales and Atlantic bottlenose dolphins. *Ecol. Lett.*, 7: 1068–1076.
- Lynn, R. J. 2003. Variability in the spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) off southern and central California. *Fish. Oceanogr.*, 12: 541–553.
- Mackas, D.L. & Beaugrand, G. 2008. Comparisons of zooplankton time series. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Mackas, D.L., Batten, S. & Trudel, M. 2007. Effects on zooplankton of a warmer ocean: recent evidence from the North East Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 75: 223–252.
- Mackas, D.L., Goldblatt, R. & Lewis, A.G. 1998. Interdecadal variation in developmental timing of *Neocalanus plumchrus* populations at OSP in the sub-Arctic North Pacific. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55: 1878–1893.
- Mackas, D.L., Peterson, W. T., and Zamon, J. 2004. Comparisons of interannual biomass anomalies of zooplankton communities along the continental margins of British Columbia and Oregon. *Deep-Sea Research II*, 51: 875–896.
- Mackas, D.L., Thomson, R.E. & Galbraith, M. 2001. Changes in the zooplankton community of the British Columbia continental margin, 1985–1999, and their covariation with oceanographic conditions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58: 685–702.
- MacKenzie, B.R. & Schiedek, D. 2007. Daily ocean monitoring since the 1860s shows record warming of northern European seas. *Glob. Change Biol.*, 13: 1335–1347.
- Mackenzie, B.R., Gislason, H., Möllmann, C. & Köster, F.W. 2007. Impact of twenty-first century climate change on the Baltic Sea fish community and fisheries. *Glob. Change Biol.*, 13: 1348–1367.
- MacLean, J.L. 1989. Indo-Pacific red tides, 1985–1988. *Mar. Pollut. Bull.*, 20: 304–310.
- Magnuson, J.J., Crowder, L.B. & Medvick, P.A. 1979. Temperature as an ecological resource. *Am. Zool.*, 19: 331–343.
- Manak, D.K. & Mysak, L.A. 1987. *Climatic atlas of Arctic Sea ice extent and anomalies, 1953–1984*. Climate research group report, 87–8. Quebec, Canada. Department of Meteorology, Montreal, McGill University: 214 pp.
- Mann, K.H. & Lazier, J.R.N. 1996. *Dynamics of marine ecosystems*. Oxford, UK. Blackwell Science.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M. & Francis, R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 78: 1069–1079.
- Marcogliese, D.J. 2001. Implications of climate change for parasitism of animals in the aquatic environment. *Can. J. Zool.*, 79: 1331–1352.
- Marra, J., Ho, C. & Trees, C.C. 2003. An alternative algorithm for the calculation of primary productivity from remote sensing data. *LDEO Technical Report 2003-1*; 27p.
- McCauley, R & Beitinger, T. 1992. Predicted effects of climate warming on commercial culture of the channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *GeoJournal* 28: 61–66.
- McClain, C.R., Feldman, G.C. & Hooker, S.B. 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep-Sea Res. II*, 51: 5–42.
- McFarlane, G.A. & Beamish, R.J. 2002. Sardines return to British Columbia waters. *PICES Scientific Report 10*: 77–82.
- McFarlane, G.A., King, J.R. & Beamish, R.J. 2000. Have there been recent changes in climate? Ask the fish. *Progr. Oceanogr.*, 47: 147–169.
- McFarlane, G.A., Schweigert, J., MacDougall, L. & Hrabok, C. 2005. Distribution and biology of Pacific sardines (*Sardinops sagax*) off British Columbia, Canada. *CalCOFI Rep.*, 46: 144–160.

- McGowan, J.A., Bograd, S.J., Lynn, R.J. & Miller, A.J. 2003. The biological response to the 1977 regime shift in the California Current. *Deep-Sea Res.* 50: 2567–2582.
- McGregor, H.V., Dima, M., Fischer, H.W. & Mulitza, S. 2007. Rapid twentieth century increase in coastal upwelling off North West Africa. *Science*, 315: 637–639.
- McKinnon, A.D., Richardson, A.J., Burford, M.A. & Furnas, M.J. 2008. Chapter 7. Vulnerability of plankton to climate change on the Great Barrier Reef. *In Climate change and the Great Barrier Reef*. Australia. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office: pp. 121–152.
- McLaughlin, J.B., DePaola, A., Bopp, C.A., Martinek, K.A., Napolilli, N.P., Allison, C.G., Murray, S.L., Thompson, E.C., Bird, M.M. & Middaugh, J.P. 2005. Outbreak of *Vibrio parahaemolyticus* gastroenteritis associated with Alaskan oysters. *N. Engl. J. Med.* 2005 Oct 6;353(14):1463–70.
- McLean, R.F. & Tsyban, A. 2001. Coastal zones and marine ecosystems. *In* J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken & K.S. White, eds. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*, pp. 343–380. Contribution of working group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- McPhaden, M.J. & Zhang, D. 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 415: 603–608.
- McWilliams, J.P., Côté, I.M., Gill, J.A., Sutherland, W.J. & Watkinson, A.R. 2005. Accelerating impacts of temperature -induced coral bleaching in the Caribbean. *Ecology*, 86: 2055–2060.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J. & Zhao, Z.C. 2007. Global climate projections. *In* S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. Cambridge University Press.
- Mieszowska, M., Kendall, M.A., Hawkins, S.J., Leaper, R., Williamson, P., Hardman-Mountford, N.J. & Southward, A.J. 2006. Changes in the range of some common rocky shore species in Britain – a response to climate change? *Hydrobiologia*, 555: 241–51.
- Miller, A.J., Alexander, M.A., Boer, G.J., Chai, F., Denman, K., Erickson, D.J., Frouin, R., Gabric, A., Laws, E., Lewis, M., Liu, Z., Murtugudde, R., Nakamoto, S., Neilson, D.J., Norris, J., Ohlmann, C., Perry, R.I., Schneider, N., Shell, K. & Timmermann, A. 2003. Potential feedbacks between Pacific Ocean ecosystems and interdecadal climate variations. *Bull. Am. Meteorological Soc.* May 2003: 617–633.
- Miller, A.J., Cayan, D.R., Barnett, T.P., Graham, N.E. & Oberhuber, J.M. 1994. The 1976–1977 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 7: 21–26.
- Miller, D.C.M., Moloney, C., van der Linden, C.D., Lett, C., Mullon, C. & Field, J.G. 2006. Modelling the effects of physical-biological interactions and spatial variability in spawning and nursery areas on transport and retention of sardine (*Sardinops sagax*) eggs and larvae in the southern Benguela ecosystem. *J. Mar. Syst.* 61: 212–229.
- Miller, L. & Douglas, B.C. 2004. Mass & volume contributions to twentieth century global sea level rise, *Nature*, 248: 407–409.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A. & Vecchia, A.V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438: 347–350.
- Minobe, S. 1997. A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.* 24: 683–686.
- Mirza, M.M.Q., Warrick, R.A. & Ericksen, N.J. 2003. The implications of climate change on floods of the Ganges, Brahmaputra and Meghna rivers in Bangladesh. *Clim. Change*, 57(3): 287–312.

- Mohseni, O., Stefan, H.G. & Eaton, J.G. 2003. Global warming and potential changes in fish habitat in United States streams. *Clim. Change*, 59: 389–409.
- Molles, M.C. Jr. & Dahm, C.N. 1990. A perspective on El Niño and La Niña: global implications for stream ecology. *J. N. Amer. Bent. Soc.*, 9: 68–76.
- Möllmann, C., Kornilovs, G., Fetter, M. & Köster, F.W. 2005. Climate, zooplankton, and pelagic fish growth in the central Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1270–1280.
- Mooij, W.M., Hülsmann, S., de Senerpont Domis, L.N., Lammens, E.H.R.R., Bodelier, P.L.E., Boers, P.C.M., Dionisio Pires, M.L., Gons, H.J., Ibelings, B.W., Nolet, B.A. & Portielje, R. 2005. The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquat. Ecol.*, 39: 381–400.
- Morgan, I.J., McDonald, D.G. & Wood, C.M. 2001. The cost of living for freshwater fish in a warmer, more polluted world. *Global Change Biol.*, 7: 345–355.
- Mote, P.W. & Mantua, N.J. 2002. Coastal upwelling in a warmer future. *Geophys. Res. Lett.*, 29(23), 2138, doi:10.1029/2002GL016086.
- Mudie, P.J., Rochon, A. & Levac, E. 2002. Palynological records of red tide-producing species in Canada: past trends and implications for the future. *Palaeogeogr. Palaeoecol.*, 180: 159–186.
- Murray, S.N. & Horn, M.H. 1989. Variations in standing stocks of central California macrophytes from a rocky intertidal habitat before and during the 1982–1983 El Niño. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 58: 113–122.
- Murtugudde, R., Beauchamp, J., McClain, C.R., Lewis, M. & Busalacchi, A.J. 2002. Effects of penetrative radiation on the upper tropical ocean circulation. *J. Climate*, 15: 470–486.
- Mysak, L.A. 1986. El Niño, interannual variability and fisheries in the North East Pacific Ocean. *Can. J. Fisher. Aquat. Sci.*, 43: 464–497.
- Nakata, K. & Hidaka, K. 2003. Decadal-scale variability in the Kuroshio marine ecosystem in winter. *Fish. Oceanogr.*, 12: 234–244.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S. & Woodroffe, C.D. 2007. Coastal systems and low-lying areas. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 315–356. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Nicholls, N. 1991. The El Niño Southern Oscillation and Australian vegetation. *Vegetatio*, 91: 23–36.
- Nixon, S.W. 1988. Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems. *Limnol. Oceanogr.*, 33: 1005–1025.
- Nyberg, P., Bergstrand, E., Degerman, E. & Enderlein, O. 2001. Recruitment of pelagic fish in an unstable climate: studies in Sweden's four largest lakes. *Ambio*, 30: 559–564.
- Okey, T.A., Wright, B.A. & Brubaker, M.Y. 2007. Salmon shark connections: North Pacific climate change, indirect fisheries effects, or just variability? *Fish and Fisher.*, 8: 359–366.
- Omori, M. 1969. Weight and chemical composition of some important oceanic zooplankton in the North Pacific Ocean. *Mar. Biol.*, 3: 4–10.
- Ono, T., Midorikawa, T., Watanabe, Y.W., Tadokoro, K. & Saino, T. 2001. Temporal increases of phosphate and apparent oxygen utilization in the subsurface waters of western sub-Arctic Pacific from 1968 to 1998. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (17): 3285–3288.
- O'Reilly, C.M., Alin, S.R., Pilsnier, P.D., Cohen, A.S. & McKee, B.A. 2003. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 424: 766–768.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G-K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L.,

- Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M-F., Yamanaka, Y. & Yool, A. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437: 681–686.
- Osovitz, C.J. & Hofmann, G.E. 2007. Marine macrophysiology: studying physiological variation across large spatial scales in marine systems. *Copm. Biochem. Physiol., Pt A*, 147: 821–827.
- Ottersen, G. & Stenseth, N.C. 2001. Atlantic climate governs oceanographic and ecological variability in the Barents Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 46: 1774–1780.
- Ottersen, G., Stenseth, N.C. & Hurrell, J.W. 2004. Climatic fluctuations and marine systems: a general introduction to the ecological effects. In N.C. Stenseth, G. Ottersen, J. Hurrell, A. Belgrano, A. eds. *Marine ecosystems and climate variation: the North Atlantic*, pp. 3–14. Oxford, UK. Oxford University Press.
- Ottersen, G., Kim, S., Huse, G., Polovina, J.J. & Stenseth, N.C. 2008. Major routes by which climate signals force marine populations. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Overland, J.E. & Stabeno, P. 2004. Is the climate of the Bering Sea warming and affecting the ecosystem? *EOS, Trans. AGU* 85(33): 309–316.
- Overland, J.E. & Wang, M. 2007. Future climate of the North Pacific Ocean. *Eos Trans. AGU*, 88: 178–182.
- Overland, J.E., Alheit, J., Bakun, A., Hurrell, J., Mackas, D.L. & Miller, A.J. 2008. Climate controls on marine ecosystems and fish populations. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Pain, C.C., Piggott, M.D., Goddard, A.J.H., Fang, F., Gorman, G.J., Marshall, D.P., Eaton, M.D., Power, P.W. & de Oliveira, C.R.E. 2005. Three-dimensional unstructured mesh ocean modeling. *Ocean Model.*, 10: 5–33.
- Palmer, T.N. 1999. A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Clim.*, 12: 575–591.
- Palmer, T.N. 1999. A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Clim.*, 12: 575–591.
- Parmesan, C. & Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421: 37–42.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E., eds. 2007. Cross-chapter case study, pp. 843–868. In *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Parsons, L.S. & Lear, W.H. 2001. Climate variability and marine ecosystem impacts: a North Atlantic perspective, *Progr. Oceanogr.* 49: 167–188.
- Pearson, R.G. & Dawson, T.P. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecol. Biogeogr.*, 12: 361–371.
- Pechenik, J.A. 1989. Environmental influences on larval survival and development. In A.C. Giese, J.S. Pearse & V.B. Pearse, eds. *Reproduction of marine invertebrates*, pp. 551–608. California, USA. Blackwell Scientific Publications.
- Peck, L.S., Webb, K.E. & Bailey, D.M. 2004. Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species. *Functional Ecology*, : pp. 625–630.
- Pelejero, C., Calvo, E., McCulloch, M.T., Marshall, J.F., Gagan, M.K., Lough, J.M. & Opdyke, B.N. 2005. Preindustrial to modern interdecadal variability in coral reef pH. *Science*, 309 (5744), 2204.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P. & McWilliams, J.C. 2006. Application of the ROMS embedding procedure in the California Current upwelling system. *Ocean Modelling*, 12: 157–187.
- Pepin, P., Orr, D.C. & Anderson, J.T. 1997. Time to hatch and larval size in relation to temperature and egg size in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54(Suppl. 1): 2–10.

- Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R. & Reynolds, J.D. 2005. Climate change and distribution shifts in marine species. *Science*, 308: 1912–1915.
- Perry, R.I., Batchelder, H.P., Chiba, S., Durbin, E., Greve, W., Mackas, D.L. & Verheye, H.M. 2004. Identifying global synchronies in marine zooplankton populations: issues and opportunities. *ICES J. Mar. Sci.*, 61: 445–456.
- Perry, R.I., Cury, P., Brander, K., Jennings, S., Möllmann, C. & Planque, B. 2008. Sensitivity of marine systems to climate and fishing: concepts, issues and management responses. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Philippart, C.J.M., van Aken, H.M., Beukema, J.J., Bos, O.G., Cadée, G.C. & Dekker, R. 2003. Climate-related changes in recruitment of the bivalve *Macoma balthica*. *Limnol. Oceanogr.*, 48: 2171–2185.
- Phillips, A.J., Ralston, S., Brodeur, R.D., Auth, T.D., Emmett, R.L., Johnson, C. & Wespestad, V.G. 2007. Recent pre-recruit pacific hake (*Merluccius productus*) occurrences in the northern California Current suggest a northward expansion of their spawning area. *CalCOFI Reports*, 48: 215–229.
- Phoenix, G.K. & Lee, J.A. 2004. Predicting impacts of Arctic climate change: past lessons and future challenges. *Eco. Res.*, 19: 65–74.
- Piatkowski, U., Vergani D.F. & Stanganelli Z.B. 2002. Changes in the cephalopod diet of southern elephant seal females at King George Island, during El Niño - La Niña events. *J. mar. biol. Ass. UK*, 82: 913–916.
- Pierce, D.W. 2004. Future changes in biological activity in the North Pacific due to anthropogenic forcing of the physical environment. *Clim. Change*, 62: 389–418.
- Pimm, S.L., Lawton, J.H. & Cohen, J.E. 1991. Food webs patterns and their consequences. *Nature*, 350: 669–674.
- Pisias, N.G., Mix, A.C. & Heusser, L. 2001. Millennial scale climate variability of the North East Pacific Ocean and Northwest North America based on radiolaria and pollen. *Q. Sci. Rev.*, 20: 1561–1576.
- Planque, B. & Frédou, T. 1999. Temperature and the recruitment of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56: 2069–2077.
- Planque, B. & Fromentin, J.M. 1996. *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. I. Spatial and temporal patterns of *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 134: 101–109.
- Planque, B., Fromentin, J-M., Cury, P., Drinkwater, K., Jennings, S., Kifani, S. & Perry, R.I. 2008. How does fishing alter marine populations and ecosystems sensitivity to climate? *J. Mar. Syst.* (in press).
- Platt, T., Fuentes-Yaco, C. & Frank, K.T. 2003. Spring algal bloom and larval fish survival. *Nature*, 423: 398–399.
- Poff, N.L., Brinson, M.M. & Day, J.W. Jr. 2002. Aquatic ecosystems and global climate change. Potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States. Report prepared for the Pew center on Global Climate Change. (Also available at www.pewclimate.org).
- Poloczanska, E.S., Babcock, R.C., Butler, A., Hobday, A.J., Hoegh-Guldberg, O., Kunz, T.J., Matear, R., Milton, D., Okey, T.A. & Richardson, A.J. 2007. Climate change and Australian marine life. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 45: 409–480.
- Polovina, J.J., Howell E.A. & Abecassis, M. 2008. Ocean's least productive waters are expanding. *Geoph. Res. Lett.*, 35: L03618.
- Polovina, J.J., Mitchum, G.T. & Evans, G.T. 1995. Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the central and North Pacific, 1960–1988. *Deep Sea Res. II*, 42: 1201–1716.
- Pörtner, H.O. 2002. Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals. *Comp. Biochem. Physiol., Pt. A*, 132: 739–761.

- Pörtner, H.O. & Knust, R. 2007. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, 315: 95–97.
- Pörtner, H.O., Berdal, B., Blust, R., Brix, O., Colosimo, A., De Wachter, B., Giuliani, A., Johansen, T., Fischer, T., Knust, R., Naevdal, G., Nedenes, A., Nyhammer, G., Sartoris, F.J., Serendero, I., Sirabella, P., Thorkildsen, S. & Zakhartsev, M. 2001. Climate induced temperature effects on growth performance, fecundity and recruitment in marine fish: developing a hypothesis for cause and effect relationships in Atlantic cod (*Ghadus morhua*) and common eelpout (*Zoarces viviparous*). *Cont. Shelf Res.*, 21: 1975–1997.
- Pörtner, H.O., Langenbuch, M. & Michaelidis, B. 2005. Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO₂ on marine animals: from earth history to global change. *J. Geophys. Res.* 110, C09S10, doi:10.1029/2004JC002561.
- Post, E. 2004. Time lags in terrestrial and marine environments. In N.C. Stenseth, G. Ottersen, J. Hurrell, A. Belgrano, eds. *Marine ecosystems and climate variation: the North Atlantic*, pp. 165–168. Oxford, UK. Oxford University Press.
- Precht, W.F. & Aronson, R.B. 2004. Climate flickers and range shifts of reef corals. *Front. Ecol. Envir.*, 2: 307–314.
- Quadrelli, R. & Wallace, J.M. 2004. A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *J. Clim.*, 17: 3728–3744.
- Quero, J.C., Du Buit, M.H. & Vayne, J.J. 1998. Les observations de poisons tropicaux et le rechauffement des eaux dans l'Atlantique européen. *Oceanol. Acta*, 21: 345–351.
- Rahmstorf, S. 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315: 368–370.
- Raitsos, D.E., Reid, P.C., Lavender, S.J., Edwards, M. & Richardson, A.J. 2005. Extending the SeaWiFS chlorophyll data set back 50 years in the North East Atlantic. *Geoph. Res. Lett.*, 32(6): art. no.-L06603.
- Reaser, J.K., Pomerance, R. & Thomas, P.O. 2000. Coral bleaching and global climate change: scientific findings and policy recommendations. *Conserv. Biology*, 14: 1500–1511.
- Rebstock, G.A. 2001. Long-term changes in the species composition of calanoid copepods off Southern California. San Diego, USA. Scripps Institute of Oceanography, University of California (Ph.D. thesis). 221pp.
- Rebstock, G.A. 2002a. Climatic regime shifts and decadal-scale variability in calanoid copepod populations off southern California. *Global Change Biology*, 8: 71–89.
- Rebstock, G.A. 2002b. An analysis of a zooplankton sampling gear change in the CalCOFI long-term monitoring program, with implications for copepod population abundance trends. *Progr. Oceanogr.*, 53: 215–230.
- Reid, P.C., Borges, M.F. & Svendsen, E. 2001. A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse Mackerel fishery. *Fish. Res.*, 50: 163–171.
- Reid, P.C., Edwards, M., Hunt, H.G. & Warner, A.J. 1998. Phytoplankton change in the North Atlantic. *Nature*, 391(6667): 546.
- Reid, P.C., Edwards, M., Beaugrand, G., Skogen, M. & Stevens, D. 2003. Periodic changes in the zooplankton of the North Sea during the twentieth century linked to oceanic inflow. *Fish. Oceanogr.*, 12: 260–269.
- Revenga, C., Brunner, J., Henninger, N., Kassem, K. & Payne, R. 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Freshwater Systems. Washington, DC, World Resources Institute.
- Richards, G.P. 2001. Enteric virus contamination of foods through industrial practices: a primer on intervention strategies. *J. Indust. Microbiol. Biotechnol.*, 27:117–125.
- Richardson, A.J. 2008. In hot water: zooplankton and climate change. *ICES J. Mar. Sci.*, 65: 279–295.
- Richardson, A.J. & Poloczanska, E.S. 2008. Under-resourced, under threat. *Science* 320: 1294–1295.
- Richardson A.J. & Schoeman, D.S. 2004. Climate impact on plankton ecosystems in the North East Atlantic, *Science*, 305: 1609–612.

- Rice, J.C. 1995. Food web theory, marine food webs, and what climate change may do to northern marine fish populations. In R.J. Beamish, ed. *Climate change and northern fish populations*, 121: 561–568. *Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Sciences*.
- Riebesell, U., Burkhardt, S., Dauelsberg, A. & Kroon, B. 2000. Carbon isotope fractionation by a marine diatom: dependence on the growth-rate limiting resource. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 193: 295–303.
- Rodhouse, P.G. 2001. Managing and forecasting squid fisheries in variable environments. *Fish. Res.* 54: 3–8.
- Rodriguez-Sánchez, R., Lluch-Belda, D., Villalobos, H. & Ortega-García, S. 2002. Dynamic geography of small pelagic fish populations in the California Current system on the regime time scale (1931–1997). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 59: 1980–1988.
- Roemmich, D. & McGowan, J.A. 1995. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science*, 267: 1324–1326.
- Roessig, J.M., Woodley, C.M., Cech, J.J. Jr. & Hansen, L.J. 2004. Effects of global change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Rev. Fish Biol. Fisheries*, 14: 251–275.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. & Pounds, J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421: 57–60.
- Rose, G.A. 2005. On distributional responses of North Atlantic fish to climate change. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1360–1374.
- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T.L., Seguin, B. & Tryjanowski, P. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 79–131. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Rowan, R. 2004. Thermal adaptations in reef coral symbionts, *Nature*, 430: 742.
- Sabine, C.S., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tillbrook, B., Millero, F.J., Peng, T-H., Kozyr, A., Ono, T. & Rios, A.F. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305: 367–371.
- Sagarin, R.D., Barry, J.P., Gilman, S.E. & Baxter, C.H. 1999. Climate-related change in an intertidal community over short and long time scales. *Ecol. Monogr.*, 69(4): 465–490.
- Sarmiento, J.L., Slater, R., Barber, R., Bopp, L., Doney, S.C., Hirst, A.C., Kleypas, J., Matear, R., Mikolajewicz, U., Monfray, P., Soldatov, V., Spall, S.A. & Stouffer, R. 2004. Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB3003, doi: 10.1029/2003GB002134: 23pp.
- Sarvala, J., Langenberg, V.T., Salonen, K., Chitamwebwa, D., Coulter, G.W., Huttula, T., Kanyaru, R., Kotilainen, P., Makasa, L., Mulimbwa, N. & Mölsä, H. 2006. Fish catches from Lake Tanganyika mainly reflect fishing practices, not climate. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 29: 1182–1188.
- Saunders, M.A. & Lea, A.S. 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature*, 451: 557–560.
- Schallenberg, M., Friedrich, U. & Burns, C.W. 2001. Postulated responses of phytoplankton and bacteria to predicted increases of inorganic suspended sediments in oligotrophic lakes. *New Zealand J. Mar. Freshw. Res.*, 35: 763–779.
- Scheffer, M. & van Nes, E.H. 2004. Mechanisms for marine regime shifts: can we use lakes as microcosms for oceans? *Progr. Oceanogr.*, 60: 303–319.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. & Walker, B. 2001a. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413: 591–596.
- Scheffer, M., Straile, D. van Nes, E.H. & Hopper, H. 2001b. Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limno., Oceanogr.*, 46: 1780–1783.

- Schindler, D.E., Rogers, D.E., Scheuerell, M.D. & Abrey, C.A. 2005. Effects of changing climate on zooplankton and juvenile sockeye salmon growth in southwestern Alaska, *Ecology*, 86: 198–209.
- Schindler, D.W. 2001. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58: 18–29.
- Schmittner, A. 2005. Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation. *Nature*, 434: 628–633.
- Schrank, W.E. 2007. The ACIA, climate change and fisheries. *Mar. Policy*, 31: 5–18.
- Sellner, K.G., Doucette, G.J. & Kirkpatrick, G.J. 2003. Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 30: 383–406.
- Shankar, B., Halls, A. & Barr, J. 2004. Rice versus fish revisited: on the integrated management of floodplain resources in Bangladesh. *Natural Resources Forum*, 28: 91–101.
- Sharp, G.D. & McLain, D.R. 1993. Fisheries, El Niño Southern Oscillation and upper-ocean temperature records: an eastern Pacific example. *Oceanography*, 6: 13–21.
- Sheppard, C.R.C. 2003. Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian Ocean. *Nature*, 425: 294–297.
- Sims, D.W., Genner, M.J., Southward, A.J. & Hawkins, S.J. 2001. Timing of squid migration reflects North Atlantic climate variability. *Proc. Roy. Soc. London, B: Biol. Sci.*, 268: 2607–2611.
- Sims, D.W., Wearmouth, V.J., Genner, M.J., Southward, A.J. & Hawkins, S.J. 2004. Low-temperature-driven early spawning migration of a temperate marine fish. *J. Anim. Ecol.*, 73: 333–341.
- Sirabella, P., Giuliani, A., Colosima, A. & Dippner, J.W. 2001. Breaking down the climate effects on cod recruitment by principal component analysis and cononical correlation. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 216: 213–222.
- Sissener, E. & Bjørndal, T. 2005. Climate change and the migratory pattern for Norwegian spring-spawning herring – implications for management. *Mar. Policy*, 29: 299–309.
- Smayda, T. J. 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic. In E. Graneli, B. Sundström, L. Edler & D.M. Anderson, eds. *Toxic marine phytoplankton*, pp. 29–40. Elsevier.
- Smith, P.J. 1979. Esterase gene frequencies and temperature relationships in the New Zealand snapper (*Chrysophrys auratus*). *Mar. Biol.*, 53: 305–310.
- Smith, R.C., Ainley, D., Baker, K., Domack, E., Emslie, S., Fraser, B., Kennett, J., Leventer, L., Mosley-Thompson, E., Stammerjohn, S. & Vernet, M. 1999. Marine ecosystem sensitivity to climate change. *Bioscience*, 49: 393–404.
- Smol, J.P., Wolfe, A.P., Birks, H.J.B., Douglas, M.S.V., Jones, V.J., Korhola, A., Pienitz, R., Rühland, K., Sorvari, S., Antoniades, D., Brooks, S.J., Fallu, M-A., Hughes, M., Keatley, B.E., Laing, T.E., Michelutti, N., Nazarova, L., Nyman, M., Paterson, A.M., Perren, B., Quinlan, R., Rautio, M., Saulnier-Talbot, É., Siitonen, S., Solovieva, N. & Weckström, J. 2005. Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 102: 4397–4402.
- Smyth, T.J., Tyrell, T. & Tarrent, B. 2004. Time series of coccolithophore activity in the Barents Sea, from 20 years of satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L11302.
- Snidvongs, A., Choowaew, S. & Chinvano, S. 2003. Impact of climate change on water and wetland resources in Mekong River basin: directions for preparedness and action. *Southeast Asia START Regional Center Report*, 12: 54 pp.
- Snyder, M.A., Sloan, L.C., Diffenbaugh, N.S. & Bell, J.L. 2003. Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophys. Res. Lett.*, 30: 1823 p.
- Southward A.J., Hawkins S.J. & Burrows, M.T. 1995. Seventy years of changes in the distribution and abundance of zooplankton and intertidal organisms in the western English Channel in relation to rising sea temperature. *J. Therm. Biol.*, 20: 127–155.
- Southward, A.J., Langmead, O., Hardman-Mountford, N.J., Aiken, J., Boalch, G.T., Dando, P.R., Genner, M.J., Joint, I., Kendall, M.A., Halliday, N.C., Harris, R.P.,

- Leeper, R., Mieskowska, N., Pingree, R.D., Richardson, A.J., Sims, D.W., Smith, T., Walne, A. W. & Hawkins, S.J. 2005. Long-term oceanographic and ecological research in the western English Channel. *Adv. Mar. Biol.*, 47: 1–105.
- Southward, A.J., Boalch, G.T. & Maddock, L. 1988. Fluctuations in the herring and pilchard fisheries of Devon and Cornwall linked to change in climate since the 16th century. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 68, pp. 423–445.
- Speirs, D., Gurney, W., Heath, M. & Wood, S.N. 2005. Modelling the basin-scale demography of *Calanus finmarchicus* in the NorthEast Atlantic fisheries. *Oceanography*, 14: 333–358.
- Stabeno, P.J., Bond, N.A., Kachel, N.B., Salo, S.A. & Schumacher, J.D. 2001. On the temporal variability of the physical environment over the southeastern Bering Sea. *Fish. Oceanogr.*, 10: 81–98.
- Stachowicz, J.J., Fried, H., Whitlatch, R.B. & Osman, R.W. 2002a. Biodiversity, invasion resistance and marine ecosystem function: reconciling pattern and process. *Ecology*, 83: 2575–2590.
- Stachowicz, J.J., Terwin, J.R., Whitlatch, R.B. & Osman, R.W. 2002b. Linking climate change and biological invasions: ocean warming facilitates non-indigenous species invasions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99: 15497–15500.
- Stefan, H.G., Hondzo, M., Eaton, J.G. & McCormick, J.H. 1995. Predicted effects of global climate change on fishes in Minnesota lakes. In R.J. Beamish, ed. *Climate Change and Northern Fish Populations*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 121: 57–72.
- Stenevik, E. & Sundby, S. 2007. Impacts of climate change on commercial fish stocks in Norwegian waters. *Marine Policy*, 31: 19–31.
- Stenseth, N.C., Mysterud, A., Ottersen, G., Hurrell, J.W., Chan, K-S. & Lima, M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. *Science*, 297: 1292–1296.
- Stenseth, N.C. & Mysterud, A. 2002. Climate, changing phenology and other life history traits: Nonlinearity and match-mismatch to the environment. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 99: 13379–13381.
- Stenseth, N., Ottersen, G., Hurrell, J.W., Mysterud, A., Lima, M., Chan, K.S., Yoccoz, N.G. & Aedlandsvik, B. 2003. Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proc. R. Soc. Lond., B* 270: 2087–2096.
- Stillman, J.H. 2002. Causes and consequences of thermal tolerance limits in rocky intertidal porcelain crabs, genus *Petrolisthes*. *Integ. and Comp. Biol.*, 42: 790–796.
- Stirling, I., Lunn, N.J. & Iacozza, J. 1999. Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climatic change. *Arctic*, 52: 294–306.
- Stocker, T.F. & Schmittner, A. 1997. Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature*, 388: 862–865.
- Stockwell, C.A., Hendry, A.P. & Kinnison, M.T. 2003. Contemporary evolution meets conservation biology. *Trend. Ecol. Evol.*, 18: 94–101.
- Straile, D. & Adrian, R. 2000. The North Atlantic Oscillation and plankton dynamics in two European lakes: two variations on a general theme. *Glob. Change Biol.*, 6: 663–670.
- Stroeve, J., Holland, M.M., Meier, W., Scambos, T. & Serreze, M. 2007. Arctic sea ice decline: faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L09501.
- Sundby, S. 2000. Recruitment of Atlantic cod stocks in relation to temperature and advection of copepod populations. *Sarsia*, 85: 277–298.
- Symon, C. (ed.). 2005. *Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Synder, M.A., Sloan, L.C., Diffenbaugh, N.S. & Bell, J.L. 2003. Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophys. Res. Lett.*, 30(15): 1823, doi: 10.1029/2003GL017647.
- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J. & Green, P.A. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308(5720): 376–380.

- Takasuka, A., Oozeki, Y. & Aoki, I. 2007. Optimal growth temperature hypothesis: why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 64: 768–776.
- Tåning, Å.V. 1948. On changes in the marine fauna of the Northwestern Atlantic. *Rapp. P.-v. Reun. Conseil int. Explor. Mer*, 125: 26–29.
- Taylor, A.H., Allen, J.I. & Clark, P.A. 2002. Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem. *Nature*, 416: 629–632.
- Taylor, A.H. 2005. A model of variations in the North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 32, L24713, doi:10.1029/2005GL023792.
- Taylor, M.H. & Wolff, M. 2007. Trophic modelling of eastern boundary current systems: a review and prospectus for solving the “Peruvian puzzle”. *Re. Per. Biol.*, 14: 87–100.
- Testa, J.W., Oehlert, G., Ainley, D.G., Bengtson, J.L., Siniff, D.B., Laws, R.M. & Rounsevelle, D. 1991. Temporal variability in Antarctic marine ecosystems: periodic fluctuations in the phocid seals. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 48: 631–639.
- Timmermann, A., Ohberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M. & Roeckner, E. 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398: 694–696.
- Timmermann A. & Jin, F. F. 2002. Phytoplankton influences on tropical climate. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2104, doi:10.1029/2002GL015434.
- Tomanek, L. & Somero, G.N. 1999. Evolutionary and acclimation-induced variation in the heat-shock responses of congeneric marine snails (genus *Tegula*) from different thermal habitats: implications for limits of thermotolerance and biogeography. *J. Exp. Biol.*, 202: 2925–2936.
- Trenberth, K.E. 1991. *Recent climate changes in the Northern Hemisphere*. In Department of the Environment workshop on greenhouse gas induced climate change. A critical appraisal of simulations and observations. Amherst, Mass, 8–12 May, 1989.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 78: 2771–2777.
- Trenberth, K.E., Caron, J.M. & Stepaniak, D.P. 2001. The atmospheric energy budget and implications for surface fluxes and ocean heat transports. *Clim. Dyn.*, 17: 259–276.
- Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B. & Zhai, P. 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA. Cambridge University Press.
- Ueber, E. & MacCall, A. 1992. The rise and fall of the California sardine empire. In M.H. Glantz, ed. *Climate variability, climate change, and fisheries*, pp. 31–48. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Vasseur, L. & Cato, N. 2008. Atlantic Canada. In D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. LaCroix & E. Bush, eds. *From Impacts to adaptation: Canada in a changing climate*, pp. 119–170. Ottawa. Government of Canada.
- Vazquez-Dominguez, E., Vaque, D. & Gasol, J. 2007. Ocean warming enhances respiration and carbon demand of coastal microbial plankton. *Global Change Biol.*, 13: 1327–1334.
- Vecchi, G.A., Soden, B.J., Wittenberg, A.T., Held, I.M., Leetmaa, A. & Harrison, M.J. 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 441: 73–76.
- Vecchi, G.A., Clement, A. & Soden, B.J. 2008. Examining the tropical Pacific’s response to global warming. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, 89(9): 81–83.
- Vellinga, M. & Wood, R.A. 2002. Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation. *Clim. Change*, 54: 251–267.

- Venrick, E.L. 1994. Scales of variability in a stable environment: Phytoplankton in the central North Pacific. In T.M. Powell & J.H. Steele, eds. *Ecological time series*, Chapter 10. New York, USA. Chapman and Hall.
- Verburg, P., Hecky, R.E. & Kling, H. 2003. Ecological consequences of a century of warming in Lake Tanganyika. *Science*, 301: 505–507.
- Vergani, D.F., Stanganelli, Z.B. & Bilenca, D. 2004. Effects of El Niño and La Niña events on the sex ratio of southern elephant seals at King George Island. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 268: 293–300.
- Vikebø, F.B., Sundby, S., Ådlandsvik, B. & Fiksen, Ø. 2005. The combined effect of transport and temperature on distribution and growth of larvae and pelagic juveniles of Arcto-Norwegian cod. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1375–1386.
- Vikebø, F.B., Jørgensen, C., Kristiansen, T. & Fiksen, Ø. 2007. Drift, growth and survival of larval North East Arctic cod with simple rules of behaviour. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 347: 207–219.
- Visser, M.E. & Both, C. 2005. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proc. R. Soc., B* 272: 256–2569.
- Vollmer, M.K., Bootsma, H.A., Hecky, R.E., Patterson, G., Halfman, G.D., Edmond, J.M., Eccles, D.H. & Weiss, R.F. 2005. Deep-water warming trend in Lake Malawi, east Africa. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 727–32.
- Vollmer, M.K., Weiss, R.F. & Bootsma, H.A. 2002. Ventilation of Lake Malawi/Nyasa. In E. Odada & D.O. Olago, eds. *The east African Great Lakes: limnology, palaeolimnology and biodiversity*, pp. 209–34. Dordrecht, Netherlands. Kluwer Academic.
- Walsh, J.E. & Timlin, M. S. 2003. Northern hemisphere sea ice simulations by global climate models. *Polar Res.*, 22: 75–82.
- Wasmund, N., Nausch, G. & Matthaus, W. 1998. Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea — spatio-temporal development and long-term trends. *J. Plankton Res.*, 20: 1099–1117.
- Ward, J.R. & Lafferty, K.D. 2004. The elusive baseline of marine disease: are diseases in ocean ecosystems increasing? *PLOS Biology*, 2: 542–547.
- Ware, D.M. & McFarlane, G.A. 1995. Climate-induced changes in Pacific hake (*Merluccius productus*) abundance and pelagic community interactions in the Vancouver Island Upwelling System. In R.J. Beamish, ed. *Climate change and northern fish populations*. *Can. Spec. Public. Fish. Aquat. Sci.*, 121: 509–521.
- Ware, D.M., & Thomson, R.E. 1991. Link between long-term variability in upwelling and fish production in the Northeast Pacific Ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 48: 2296–2306.
- Watanabe, Y.W., Ishida, H., Nakano, T. & Nagai, N. 2005. Spatiotemporal decreases of nutrients and chlorophyll-a in surface mixed layer of the western North Pacific from 1971 to 2000. *J. Oceanogr.*, 61: 1011–1016.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C. & Moss, R.H., eds. 1997. *IPCC special report on the regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability*, p. 517. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Watters, G.M., Olson, R.J., Francis, R.C., Fiedler, P.C., Polovina, J.J., Reilly, S.B., Aydin, K.Y., Boggs, C.H., Essington, T.E., Walters, C.J. & Kitchell, J. F. 2003. Physical forcing and the dynamics of the pelagic ecosystem in the eastern tropical Pacific: simulations with ENSO-scale and global-warming climate drivers. *Can. J. Fisher. Aquat. Sci.*, 60: 1161–1175.
- Weijerman, M., Lindeboom, H. & Zuur, A.F. 2005. Regime shifts in marine ecosystems of the North Sea and Wadden Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 298: 21–39.
- Welcomme, R.L. & Halls, A. 2001. Some considerations of the effects of differences in flood patterns on fish populations. *Ecology and Hydrobiology*, 1: 313–321.
- Welch, D., Ishida, Y. & Nagasawa, K. 1998. Thermal limits and ocean migrations of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): long-term consequences of global warming. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55: 937–948.

- Werner, F.E., Ito, S., Megrey, B.A. & Kishi, M.J. 2007. Synthesis and future directions of marine ecosystem models. *Ecol. Model.*, 202(1-2): 211–223.
- Wiig, Ø., Aars, J. & Born, E.W. 2008. Effects of climate change on polar bears. *Science Progress*, 92: 151–173.
- Wilkinson, C. (ed.). 2000. *Status of coral reefs of the world: 2000*. Australian Institute of Marine Science. Townsville, Australia.
- Willis, J.K., Roemmich, D. & Cornuelle, B. 2004. Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.*, 109, C12036, doi: 10.1029/2003JC002260c.
- Winder, M. & Schindler, D.E. 2004a. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic system. *Ecology*, 85: 3178–3178.
- Winder, M. & Schindler, D.E. 2004b. Climatic effects on the phenology of lake processes. *Glob. Change Biol.*, 10: 1844–1856.
- Worm, B. & Duffy, J.E. 2003. Biodiversity, productivity and stability in real food webs. *Trends Ecol. Evol.*, 18: 628–632.
- Yndestad, H. 1999. Earth nutation influence on the temperature regime of the Barents Sea. *ICES J. Mar. Sci.*, 56: 381–387.
- Zacherl, D., Gaines, S.D. & Lonhart, S.I. 2003. The limits to biogeographical distributions: insights from the northward range extension of the marine snail, *Kelletia kelletii* (Forbes, 1852). *J. Biogeogr.*, 30: 913–924.
- Zeeberg, J.J., Corten, A., Tjoe-Awie, P., Coca, J. & Hamady, B. 2008. Climate modulates the effects of *Sardinella aurita* fisheries off Northwest Africa. *Fish. Res.*, 89: 65–75.
- Zepp, R.G., Callaghan, T.V. & Erickson, D.J. 2003. Interactive effects of ozone depletion and climate change on biogeochemical cycles. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2: 51–61.
- Zondervan, I., Zeebe, R.E., Rost, B. & Riebesell, U. 2001. Decreasing marine biogenic calcification: a negative feedback on rising atmospheric CO₂. *Global Biogeochem. Cycl.*, 15 (2): 507–516.

El cambio climático y la pesca de captura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación

Tim Daw, W. Neil Adger y Katrina Brown
Universidad de Anglia Oriental
Norwich NR4 7TJ
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte
t.daw@uea.ac.uk; k.brown@uea.ac.uk; n.adger@uea.ac.uk

Marie-Caroline Badjeck
Centro Mundial de Pesca
Penang
Malasia
m.badjeck@cgiar.org

Daw, T.; Adger, W.N.; Brown, K. y Badjeck, M.-C. 2009. El cambio climático y la pesca de captura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación. En K. Cochrane, C. De Young, D. Soto y T. Bahri (eds). Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura, N° 530. Roma, FAO. pp. 119–168.

RESUMEN

Según se predice, el cambio climático repercutirá directa e indirectamente en las pesquerías de captura marinas y de aguas continentales lo que afectará las economías dependientes de la pesca, las comunidades pesqueras y los pescadores. En este estudio técnico se examinan dichas repercusiones pronosticadas y se introducen y aplican los conceptos de vulnerabilidad, de adaptación y de capacidad de adaptación.

Como el agente impulsor de las pesquerías de captura es, en buena parte, el combustible fósil, las operaciones que se llevan a cabo en el ámbito de estas pesquerías contribuyen, según las estimaciones, en 40-130 Tg¹ CO₂ a las emisiones de gases de efecto invernadero. Otra fuente de emisiones deriva del transporte de las capturas, cuya cuantía es incierta y puede superar la de las emisiones producidas por las operaciones pesqueras, debido a que las modalidades del transporte y las distancias a que son conducidos los productos pueden variar. Las medidas de mitigación pueden tener repercusiones en las pesquerías, porque incrementan el costo de uso de los combustibles fósiles.

Las repercusiones del cambio climático en las pesquerías y en los pescadores pueden ser muy variadas. Pueden, por ejemplo, producirse repercusiones biofísicas sobre la distribución o la productividad de las poblaciones marinas y de aguas continentales a causa de la acidificación de los océanos, de los daños sufridos por el hábitat, de los cambios oceanográficos y de perturbaciones que afectan a las precipitaciones y a la disponibilidad de agua dulce. Las pesquerías se verán asimismo expuestas a diferentes repercusiones climáticas directas e indirectas, tales como los desplazamientos

¹ Teragramos (Tg) - 1 Tg = 1 000 000 000 000 g = 10¹² g

y movimientos migratorios humanos, los efectos de la subida del nivel del mar en las comunidades e infraestructuras costeras, y los cambios en la frecuencia, distribución e intensidad de las tormentas tropicales.

Las pesquerías son sistemas socioecológicos dinámicos que están experimentando cambios acelerados relacionados con los mercados, la explotación y las formas de gobernanza; y que presentarán, ante los futuros impactos ligados al clima, un contexto en constante evolución. Las tendencias socioeconómicas actuales, que se suman a los efectos indirectos del cambio climático, pueden interactuar con las repercusiones biofísicas que se ejercen en la ecología pesquera, amplificarlas e incluso rebasarlas. La variedad de los mecanismos generadores de impactos, la complejidad de las interacciones entre los sistemas sociales, ecológicos y económicos, y la posibilidad de que ocurran alteraciones repentinas y sorpresivas dificultan predecir los efectos futuros del cambio climático en las pesquerías.

La vulnerabilidad de las pesquerías y comunidades pesqueras resulta de su exposición y de su susceptibilidad a los cambios, pero depende también de la aptitud de los individuos y sistemas de anticipar las alteraciones y adaptarse a ellas. La capacidad de adaptación descansa en diversos activos, pero puede verse limitada por factores culturales o por la marginación. La vulnerabilidad varía de un país a otro y de una comunidad a otra, y, en el seno de la sociedad, entre los distintos grupos demográficos. Por lo general, los países más pobres y menos dotados son más vulnerables a las repercusiones del clima, y en el sector pesquero la vulnerabilidad tiende a ser mayor cuando las pesquerías ya sufren sobreexplotación y sobrecapacidad.

Para responder al cambio climático, los individuos o las instituciones públicas deben ser capaces de reaccionar o de llevar a cabo acciones que anticipen los fenómenos de cambio. Éstas podrían comprender desde el abandono total de las actividades pesqueras para optar por ocupaciones alternativas hasta la creación de dispositivos de seguro o sistemas de alerta y la modificación de las operaciones pesqueras. Los procedimientos de gobernanza pesquera afectan el abanico de las opciones de adaptación disponibles, y deberán ser lo suficientemente flexibles para tener en cuenta los cambios que se producen en la distribución de las poblaciones y en los índices de abundancia. Se estima que los métodos de gobernanza orientados a la creación de pesquerías equitativas y sostenibles, y en los que los factores inherentes de incertidumbre son tomados en consideración –y que se fundan en un enfoque ecosistémico como aquel por el cual hoy se aboga–, son los que por lo general incrementan la capacidad de adaptación en las pesquerías. No obstante, las actuaciones de adaptación pueden ser costosas y su alcance puede ser limitado, de modo que las intervenciones destinadas a mitigar las emisiones que tienen por finalidad de minimizar los efectos del cambio climático siguen siendo una de las responsabilidades clave de los gobiernos.

AGRADECIMIENTOS

Este informe ha sido compilado gracias a los aportes de Eddie Allison, del Centro Mundial de Pesca (Penang), y fue enriquecido con los comentarios formulados por los participantes en el Taller FAO de expertos sobre las consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura, celebrado en Roma del 7 al 9 de abril de 2008. Los comentarios de Cassandra De Young también contribuyeron a perfeccionar el informe.

ÍNDICE

Mensajes clave	123
1. Introducción	125
1.1 Contribución de las pesquerías a la seguridad alimentaria	125
1.2 Contribución de las pesquerías a los medios de vida y al desarrollo económico	125
1.3 Tendencias y situación actual de las pesquerías	126
1.4 Exposición y susceptibilidad de las pesquerías al cambio climático	127
2. Marcos conceptuales	128
2.1 Categorías de pesquerías	128
2.2 Vulnerabilidad y capacidad de recuperación	129
2.3 Pesquerías, pobreza, medios de vida y el contexto socioeconómico de la pesca	130
2.4 Cambio climático y variabilidad climática	132
2.5 Unidades y escalas del análisis	132
3. Pesquerías y mitigación de los efectos del cambio climático	132
3.1 Contribución de las pesquerías a las emisiones de gases de efecto invernadero	132
3.1.1 Emisiones producidas por las operaciones pesqueras	132
3.1.2 Mitigación de las emisiones producidas por las operaciones pesqueras	135
3.1.3 Emisiones generadas por las operaciones de mercadeo	135
3.1.4 Otras formas de contribución potencial de las pesquerías a la mitigación	136
3.2 Repercusiones de las acciones mundiales de mitigación en las pesquerías	136
4. Repercusiones del cambio climático en las pesquerías	137
4.1 Repercusiones potenciales y cauces de las repercusiones	137
4.2 Repercusiones por sector	139
4.2.2 Pesquerías marinas en pequeña escala y artesanales	139
4.2.3 Pesquerías marinas en gran escala	140
4.2.4 Pesquerías continentales	141
4.3 Repercusiones en el mercado y en los intercambios comerciales	142
4.4 Potenciales repercusiones positivas	143
4.5 Repercusiones observadas y repercusiones futuras	143
4.5.1 Repercusiones observadas del cambio y de la variabilidad climática	143
4.5.2 Otras repercusiones probables que pueden tener lugar durante los próximos 50 años	144
4.5.3 Repercusiones del cambio climático en el contexto de otras tendencias	146
4.5.4 Repercusiones sinérgicas	146
4.5.5 Incertidumbre de las repercusiones	146
4.6 Vulnerabilidad de las regiones, de los grupos sociales y de zonas conflictivas	147
4.6.1 Regiones geográficas caracterizadas por un alto índice de exposición potencial	148
4.6.2 Economías vulnerables	149
4.6.3 Vulnerabilidad de las comunidades	150

4.6.4	Grupos vulnerables dentro de la sociedad (variaciones demográficas de la vulnerabilidad)	150
4.6.5	Vacíos cognoscitivos en materia de vulnerabilidad	153
5.	Adaptación de las pesquerías al cambio climático	154
5.1	Ejemplos de adaptación en el sector pesquero	155
5.1.1	La adaptación en el ámbito de la ordenación pesquera	157
5.1.2	Función de las instituciones en la adaptación	157
5.2	Creación de capacidad de adaptación en las pesquerías	158
5.2.1	Factores de incertidumbre y de sorpresa, y la necesidad de construir una capacidad de adaptación general	158
5.2.2	Revisión de los postulados iniciales	158
6.	Conclusión	159
7.	Bibliografía	162

MENSAJES CLAVE

1. La seguridad alimentaria de las comunidades pesqueras se verá afectada por los efectos del cambio climático a través de múltiples cauces; por ejemplo, por el desplazamiento de las personas hacia las costas, las repercusiones en las infraestructuras costeras y en los espacios habitables, y por conductos biofísicos fácilmente observables o por la alteración de la productividad pesquera o disponibilidad de peces. Los cambios indirectos y las tendencias pueden interactuar, ampliar o incluso desbordar los impactos biofísicos en la ecología de los peces.
2. A corto plazo, los problemas y tendencias no vinculados al clima, por ejemplo los cambios en los mercados, la demografía, los regímenes de sobreexplotación y de gobernanza, pueden tener efectos más pronunciados en las pesquerías que el cambio climático mismo.
3. La capacidad de adaptación al cambio climático se distribuye de manera desigual entre las comunidades pesqueras y en el seno de cada comunidad. Esta capacidad está determinada en parte por los recursos materiales, pero también por redes y tecnologías y por estructuras de gobernanza apropiadas. Los patrones de vulnerabilidad de los pescadores a los efectos del cambio climático están determinados tanto por la capacidad de adaptación como por los cambios observados y por los cambios futuros en los ecosistemas y en la productividad de la pesquería.
4. Gracias a la creación de capacidad de adaptación, es posible reducir la vulnerabilidad a muchos tipos de repercusiones, a veces impredecibles o imprevistas. El papel clave de las intervenciones del gobierno es facilitar la capacidad de adaptación en el seno de las comunidades vulnerables.
5. Existen varias opciones potenciales de adaptación para las pesquerías, pero aun si sus beneficios son significativos las limitaciones que conlleva su ejecución por los agentes interesados serán considerables. En cuanto a las intervenciones gubernamentales, podrá ser necesario hacer concesiones en lo que respecta a la eficacia, a la selección de los individuos más vulnerables que es preciso atender, y a la creación de las condiciones de resiliencia para el sistema.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contribución de las pesquerías a la seguridad alimentaria

El pescado es un alimento altamente nutritivo, por lo que aún en pequeñas cantidades puede mejorar la dieta de las personas (FAO, 2007a). El pescado proporciona nutrientes vitales ausentes en los productos amiláceos típicos que predominan en la dieta de las personas pobres (FAO, 2005a). En 127 países en desarrollo, el pescado aporta cerca del 20 por ciento de la ingesta de proteínas animales (Thorpe *et al.*, 2006) y esta proporción puede alcanzar el 90 por ciento en los pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID) o en las zonas costeras (FAO, 2005a). Aunque en las últimas décadas una proporción de pescado importante y en aumento ha provenido de la acuicultura, aproximadamente dos tercios del pescado procede aún de la pesca de captura².

Las pesquerías pueden también contribuir indirectamente a la seguridad alimentaria ya que proporcionan ingresos con los que los países con déficit de alimentos pueden comprarlos. Las exportaciones de pescado de los países de bajos ingresos con déficit de alimentos equivalen al 50 por ciento del costo de sus importaciones de alimentos (FAO, 2005a).

1.2 Contribución de las pesquerías a los medios de vida y al desarrollo económico

Se estima de forma conservadora que 43,5 millones de personas son empleadas directamente en la pesca y la acuicultura de las cuales más del 90 por ciento son pequeños pescadores (FAO, 2005a). Además de las personas directamente empleadas en la pesca, hay “vínculos hacia adelante” a otras actividades económicas generadas por el suministro de pescado (comercio, procesamiento, transporte, ventas al detalle, etc.) y “vínculos hacia atrás” a actividades de apoyo (la construcción de embarcaciones, fabricación de redes, fabricación y reparación de motores, prestación de servicios a los pescadores y abastecimiento de combustible para barcos de pesca, etc.) Tomando en cuenta estas otras actividades, se piensa que más de 200 millones de personas dependen de la pesca en pequeña escala en los países en desarrollo, además de los millones a quienes la pesca da ingresos suplementarios (FAO, 2005a). La pesca es una actividad disponible, frecuentemente ejercida en las áreas rurales remotas donde las posibilidades de encontrar empleo en otros sectores son muy reducidas, y puede por tanto representar un importante motor del crecimiento y de desarrollo de medios de vida en las zonas en las que las alternativas económicas son escasas (FAO, 2005a). Algunos pescadores son trabajadores especializados que dependen enteramente de la pesca para su sustento; mientras que para muchos otros, especialmente en las pesquerías continentales y en los países en desarrollo, las pesquerías forman parte de una estrategia diversificada de medios de vida (Allison y Ellis, 2001; Smith, Nguyen Khoa y Lorenzen, 2005). La pesca puede servir de «red de seguridad» para los pobres sin tierras o cuando otros medios de vida fracasan (FAO, 2005a).

Muchos pequeños pescadores viven en la pobreza, concepto que a menudo se interpreta como un estado resultante de la degradación de los recursos y/o del fallo de la función de red de seguridad que las pesquerías representan para los individuos más pobres de la sociedad. Esta idea generalizadora de la pobreza económica de los pescadores en el mundo en desarrollo refleja una parte de la situación de estas personas, pero no da cuenta de que los pescadores de pequeña escala pueden ganar más que sus pares en sus respectivas comunidades, ni de que su pobreza es una condición de dimensiones múltiples y tiene que ver con su vulnerabilidad a factores de estrés tales como el VIH/SIDA, la marginación política, y el deficiente acceso a los servicios centrales y a la

² Las pesquerías de captura proveen el 50 por ciento del pescado destinado a la producción de alimentos y suministran el 58 por ciento de la producción pesquera total, incluidos los mamíferos marinos, cocodrilos, corales, esponjas, crustáceos y plantas acuáticas (FAO, 2009).

atención sanitaria (Bene, 2003; FAO, 2005a). Las pesquerías en pequeña escala, y en especial las pesquerías continentales, han sido a menudo marginadas y su contribución a la seguridad alimentaria y a la reducción de la pobreza ha sido infravalorada.

1.3 Tendencias y situación actual de las pesquerías

Las repercusiones del cambio climático se ejercerán transversalmente en el contexto de los factores que impulsan hoy las pesquerías, de las tendencias que sigue el sector y de la situación actual de las pesquerías.

Tras los rápidos aumentos de producción registrados desde el decenio de 1950, el rendimiento global de la pesca se ha estancado y puede estar disminuyendo. Muchas poblaciones han sido sobreexplotadas o corren el riesgo de serlo (Hilborn *et al.*, 2003; FAO, 2005b). Esta opinión es sustentada por las estadísticas de la FAO, que indican que la producción de las pesquerías marinas alcanzó su cota máxima en el decenio de 1980 y que a lo largo de los últimos años casi el 50 por ciento de las pesquerías han estado explotadas al máximo de su capacidad, el 25 por ciento ha estado sobreexplotada, sufrido colapso o está en declive, y que sólo 25 por ciento ha mostrado potencial de aumento de la producción (FAO, 2007a).

La producción de las pesquerías continentales ha aumentado durante los últimos 50 años, cifrándose en alrededor de 9 millones de toneladas en 2002, aunque esta tendencia ha estado acompañada en muchos sistemas lacustres y fluviales por la sobrepesca y el colapso de algunas especies grandes de alto valor. Se ha producido una «sobrepesca ecosistémica» debido a que el mosaico de especies ha sido debilitado porque los pescadores utilizan redes de menor tamaño para capturar especies más pequeñas y de menor valor (Allan *et al.*, 2005). Las poblaciones continentales también se han visto afectadas por la contaminación, la alteración del hábitat, los efectos ocasionados por las infraestructuras (planes de gestión de presas y aguas) y la introducción de especies exóticas y cultivadas (Allan *et al.*, 2005).

Además del desplome de las poblaciones, la sobrepesca ha causado por lo general la reducción de los ingresos y de la eficiencia económica, el aumento de la variabilidad y la disminución de la capacidad de recuperación de las poblaciones, y ha limitado las capturas (Hsieh *et al.*, 2006).

Los ecosistemas acuáticos han sido profundamente alterados por la pesca, y se ha difundido la tendencia a pescar en niveles cada vez más bajos de la red trófica a medida que los peces disminuyen en los niveles superiores; esto ha determinado la merma de las cosechas en los niveles tróficos inferiores (Pauly *et al.*, 1998; Allan *et al.*, 2005) y una serie de efectos perjudiciales en el ecosistema tales como la perturbación de hábitats susceptibles debido al uso de explosivos subacuáticos para pescar, sustancias venenosas y las pesadas redes de arrastre que causan daños a su paso. Actualmente se piensa que las especies de peces objetivo, e incluso ciertas especies marinas altamente reproductivas, pueden llegar a extinguirse (Sadovy y Cheung, 2003), mientras que los impactos sufridos por las especies capturadas incidentalmente y por los hábitats también suponen pérdidas de biodiversidad acuática (Worm *et al.*, 2006; Allan, 2005) que pueden repercutir en ciertos procesos ecológicos como la depredación (Myers *et al.*, 2007), la bio-erosión (Bellwood, Hoey y Choat, 2003), la provisión de alimento a las aves marinas (Jahncke, Checkley y Hunt, 2004) y el transporte de los nutrientes (Allan *et al.*, 2005). Al introducir una nueva presión selectiva dominante, la pesca afecta probablemente también el carácter genético de las poblaciones (Hutchings, 2000).

Muchas pesquerías industrializadas se ven lastradas por la sobreinversión y el exceso de capacidad pesquera (Hilborn *et al.*, 2003), lo que hace económica y políticamente difícil reducir las actividades de pesca para ajustarlas a los índices de productividad biológica (Ludwig, Hilborn y Walters, 1993). Así, aun en ausencia de alteraciones atribuibles al cambio climático, se estima en general que es necesario reducir la capacidad y el esfuerzo de pesca en la mayoría de las pesquerías.

Algunos casos de colapso muy notables, como el de las poblaciones de anchoveta de Perú, de las pesquerías de bacalao del Atlántico noroccidental y de holoturias en el océano Índico tropical y el Pacífico, son ejemplos emblemáticos de fracaso de la ordenación pesquera (pese, en el caso de las primeras, a inversiones considerables en investigación científica) y de la dificultad de explotar muchas poblaciones de forma sostenible. Se ha tomado cada vez más conciencia de la importancia de entender los aspectos humanos de las pesquerías y de centrarse en la gobernanza pesquera más que sólo en aspectos de ordenación. Actualmente se está prestando mayor atención a los incentivos creados por las medidas de gestión y los acuerdos institucionales en torno a la pesca, incluida la incorporación de los pescadores locales y sus conocimientos a través de co-gestión e iniciativas comunitarias de gestión (Jentoft, 2006; Hilborn, 2003). Esta tendencia ha estado acompañada por el reconocimiento de la necesidad de tener en cuenta los ecosistemas dentro en los cuales se insertan las pesquerías. Tanto el compromiso de las partes interesadas como la toma en consideración del ecosistema amplio son elementos que se han incorporado en el enfoque ecosistémico de la pesca (FAO, 2003a).

Otra tendencia clave que caracteriza las pesquerías es su creciente orientación comercial y su globalización. Incluso las pesquerías en pequeña escala son, hasta cierto punto, pesquerías comerciales porque al menos una porción de las capturas se destina a la venta (Berkes *et al.*, 2001). Mientras tanto, el comercio internacional de productos pesqueros ha aumentado fuertemente hasta el decenio de 1990. El 40 por ciento del valor total y el 33 por ciento del volumen total del pescado producido entran en el comercio internacional. Casi la mitad de este volumen es exportado por países en desarrollo (Delgado *et al.*, 2003), representando ingreso de exportación superior al de cualquier otro producto alimenticio (Thorpe *et al.*, 2006). En el caso de algunas pesquerías específicas de productos de alto valor, como los erizos o los peces de arrecife vivos, la demanda proveniente de mercados situados en la parte opuesta del mundo puede influir en los pescadores de zonas remotas y determinar para las pesquerías un desarrollo acelerado, la sobreexplotación y el colapso en un período de unos pocos años (Berkes *et al.*, 2006; Scales *et al.*, 2005).

1.4 Exposición y susceptibilidad de las pesquerías al cambio climático

Las pesquerías marinas y de aguas continentales son susceptibles a un amplio espectro de repercusiones ocasionadas por el cambio climático. Es ya conocida la sensibilidad de los sistemas ecológicos que sustentan las pesquerías a la variabilidad climática. Por ejemplo, en 2007, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) puso de relieve los distintos riesgos que el cambio climático impone a los sistemas acuáticos, por ejemplo, la pérdida de humedales costeros, el descoloramiento de los corales y los cambios en la distribución y cronología de los flujos hídricos; y reconoció que la acidificación de los océanos, cuyos efectos son aún inciertos, podría, según las predicciones, ejercer graves impactos en los ecosistemas marinos (Orr *et al.*, 2005). Al mismo tiempo, están los aspectos humanos de las pesquerías: los pescadores, pesquerías, comunidades pesqueras e industrias afines están concentradas en zonas de costa o en tierras bajas cada vez más expuestas a riesgos por la subida del nivel de los mares, de acontecimientos climáticos extremos y de presiones humanas múltiples (Nicholls *et al.*, 2007a). Mientras que la pobreza de las comunidades pesqueras u otras formas de marginación reducen la capacidad de adaptación y de respuesta de éstas a los cambios, la creciente globalización de los mercados pesqueros está creando situaciones de vulnerabilidad frente a los trastornos comerciales provenientes del cambio climático.

Un aspecto esencial de la socio-economía de las pesquerías continentales, que puede influir en la manera en que éstas interactúan con los efectos del cambio climático, es la marcada estacionalidad de muchas de las muy productivas pesquerías que se realizan

en los llanos inundables, por ejemplo en Asia sudoriental y Bangladesh (Dixon *et al.*, 2003). Se relaciona hasta cierto punto con esta tendencia el hecho de que las pesquerías continentales suelen ser llevadas a cabo por personas que no se definen como pescadores, sino que desarrollan actividades pesqueras durante algunas estaciones de año junto a otras ocupaciones que realizan como medios de vida alternativos (Smith *et al.*, 2005).

Las repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático y su pertinencia para los ambientes marinos y de aguas dulces fue el tema central tratado por Barange y Perry en el primer capítulo de este estudio; el presente trabajo se concentra en las repercusiones de estos fenómenos y sus interconexiones ambientales sobre los pescadores y sus comunidades. Allison *et al.* (2005) estudiaron a fondo las repercusiones potenciales del cambio climático en las pesquerías de captura. Este informe se basa en ejemplos de Allison *et al.* (2005), pero pretende centrarse en nuevos descubrimientos, otras vías de impacto y problemas planteados posteriormente.

2. MARCOS CONCEPTUALES

2.1 Categorías en que se inscriben las pesquerías

Las pesquerías manifiestan una gran diversidad en cuanto a magnitud, medio ambiente en el que operan, especies capturadas, tecnología utilizada, mercados a los que se destinan los productos, pescadores, acuerdos de ordenación y contexto político (Berkes *et al.*, 2001; Jennings, Kaiser y Reynolds, 2001). Estos factores determinan la forma en que cada pesquería puede ser afectada por el cambio climático. Para simplificar esta diversidad, las pesquerías serán tratadas con arreglo a dos agrupaciones generales: las pesquerías en gran escala e industrializadas, y las en pequeña escala y artesanales. Algunas de las características de las pesquerías, pertinentes para la cuestión del cambio climático, se ilustran en la Tabla 1. Las pesquerías en pequeña escala emplean a más del 99 por ciento de los pescadores pero producen aproximadamente el 50 por ciento de las capturas marinas mundiales.

Las pesquerías que capturan pescado para producción de harina y aceite se distinguen claramente de las que producen pescado con fines alimentarios, puesto que unas y otras están sujetas a diferentes dinámicas de mercado y porque sus repercusiones para la sociedad son distintas.

TABLA 1

Algunas diferencias generales entre las pesquerías en grande y en pequeña escala

Característica	Pesquerías industriales en gran escala	Pesquerías artesanales en pequeña escala
Realizadas por	Países desarrollados principalmente.	Países en desarrollo principalmente.
Localizadas en	Aguas marinas (a menudo oceánicas) principalmente.	Aguas marinas costeras y aguas continentales.
Embarcaciones y equipo	Mecanizados, tecnología avanzada, disponen de flotas que faenan en aguas distantes y que no se limitan a las aguas locales.	De funcionamiento manual, tecnología simple; la pesca se limita a las aguas locales.
Consumo de combustible	Elevado (14 a 19 millones de toneladas, 2 a 5 toneladas de pescado/t de combustible).	Bajo (1 a 2,5 millones de toneladas, 2 a 5 toneladas de pescado/t de combustible).
Aprovechamiento de la captura	Mercados internacionales de elevado valor, para la producción de y reducción a harina.	Para producción de alimentos, de consumo principalmente local, pero de valor cada vez más elevado valor a nivel mundial.
Empleos directos	~500 000 pescadores.	~50 millones de pescadores.
Capturas por hora de trabajo	Elevadas.	Bajas.
Pescadores	A jornada completa, profesionales, ingresos generalmente elevados en relación con los de la sociedad.	A jornada completa y a jornada parcial, generalmente pobres.
Complejidad de la pesquería	Reducida, pocas unidades pesqueras, equipos parecidos, pocas especies.	Elevada, mayor número de unidades pesqueras y equipos variados, muchas especies.
Capacidad de ordenación	Elevada, grandes estructuras de gestión burocrática, gran capacidad científica e investigativa.	Escasa, las comunidades pesqueras están en lugares remotos y alejados del gobierno, la información científica disponible es poca a nula.

Fuentes: según Berkes *et al.*, 2001; Pauly, 2006; y Baelde, 2007.

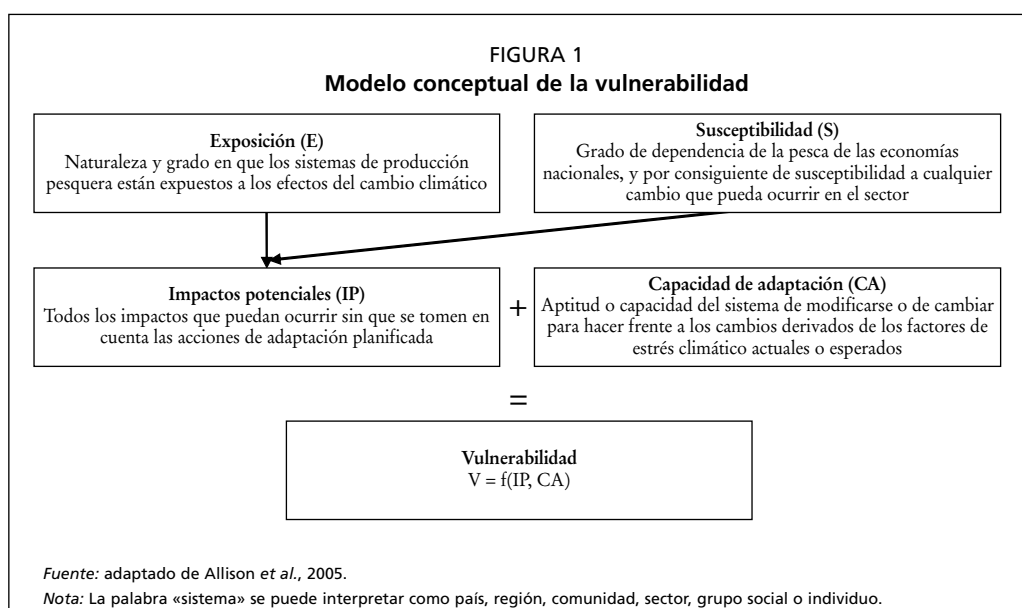
Las pesquerías continentales de agua dulce se diferenciarán en este análisis de las pesquerías marinas. Las pesquerías continentales están basadas en sistemas biofísicos muy distintos de aquellos en los que se desarrollan las pesquerías marinas, pero en el presente estudio, que se concentra en las repercusiones del cambio climático en los pescadores más que en los mecanismos biofísicos, el análisis de la vulnerabilidad y la pobreza será, en su mayor parte, pertinente tanto para las pesquerías marinas en pequeña escala como para las continentales (que, por índole propia, son pesquerías en pequeña escala).

2.2 Vulnerabilidad y capacidad de recuperación

La vulnerabilidad se ha convertido en un concepto clave de la literatura sobre el cambio climático, y se define como la susceptibilidad de los grupos o individuos a los daños resultantes de los cambios climáticos. La vulnerabilidad se exagera a menudo por otros factores de estrés, y da testimonio de que el modo en que las personas y los sistemas se ven afectados por el cambio climático depende de amenazas medioambientales externas, de los factores internos que determinan las repercusiones que puedan ejercer tales amenazas, y de cómo los sistemas y los individuos son capaces de responder dinámicamente a los cambios. Según el IPCC, la vulnerabilidad se define en «... función del tipo, magnitud y ritmo de la variación climática al que está expuesto el sistema, de su susceptibilidad y de su capacidad de adaptación» (McCarthy *et al.*, 2001: p. 995). Estos elementos se describen en la Figura 1, que distingue claramente los impactos de los factores de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad de un individuo, de una comunidad o de un grupo social más amplio depende de su capacidad de respuesta ante factores de estrés externo que pueden ser causados por la variabilidad del ambiente o por cambios resultantes de fuerzas económicas o sociales que se originan fuera del ámbito local. La vulnerabilidad es un concepto complejo que está determinado por una combinación de caracteres naturales y sociopolíticos y por la geografía. La vulnerabilidad puede acrecentarse por factores no ligados al clima –tales como la pobreza, la desigualdad, la inseguridad alimentaria, los conflictos, las enfermedades y la globalización– que repercuten en la exposición, susceptibilidad y capacidad de adaptación de los sistemas, comunidades e individuos (Adger *et al.*, 2007).

La capacidad de recuperación (o resiliencia) es un concepto que se relaciona con la vulnerabilidad y la adaptabilidad. Se aplica cada vez más en el contexto de la ordenación de sistemas sociales y ecológicos enlazados tales como las pesquerías. La



idea de resiliencia reconoce implícitamente el carácter de «sistemas complejos» de los sistemas enlazados, y el hecho de que en ellos se producen comportamientos inciertos y sorprendidos, como conductas encauzadas y estados estables alternativos; y que se manifiestan umbrales y períodos de aparente estabilidad interrumpidos por cambios bruscos que dan lugar a comportamientos cualitativamente diferentes. La adopción de una aproximación fundada en la resiliencia no se enfoca en la aptitud del sistema para resistir al cambio, sino que hace hincapié en la importancia de los factores de disturbio y en la capacidad de reorganización y de renovación. Como se trata de un concepto dinámico, la resiliencia permite dar cuenta de los efectos inciertos del cambio climático en sistemas complejos como las pesquerías.

Desde el punto de vista socio-ecológico, el concepto de resiliencia engloba como aspectos importantes el aprendizaje social, los sistemas de conocimiento, el liderazgo, las redes e instituciones sociales que facilitan los recorridos por un medio perturbado, y la adaptación al cambio y el manejo de las propiedades de recuperación del sistema para que éste se mantenga en un estado estable (Folke, 2006). Así pues, considérase que es resiliente el sistema capaz de absorber los elementos de perturbación manteniendo sus funciones básicas; de auto-organizarse y de crear en los sujetos la facultad del aprendizaje. La resiliencia de la producción acuática en el mundo en desarrollo se ha definido como la aptitud de esa producción para «absorber las conmociones y reorganizarse... tras una situación de estrés y de alteración, conservando sin embargo su capacidad de proporcionar beneficios que permiten reducir la pobreza» (Allison, Andrew y Oliver, 2007).

2.3 Pesquerías, pobreza, medios de vida y el contexto socioeconómico de la pesca

La pobreza de muchas comunidades pesqueras ha sido entendida convencionalmente como una condición que deriva de factores endógenos, debido a la inevitable sobreexplotación y bajos beneficios producidos por los recursos de acceso abierto (los individuos son pobres porque su ocupación es la pesca); o que procede de factores exógenos, a causa de la afluencia al sector pesquero de los individuos más pobres de entre los pobres, quienes consideran que la pesca es su recurso de última instancia (su estado de pobreza es la razón de que opten por ocuparse en la pesca [Bene, 2003]). Sin embargo, tanto Bene (2003) como Smith, Nguyen Khoa y Lorenzen (2005) conceden que esta manera de considerar el asunto es simplificadora en exceso, y que las pesquerías en pequeña escala deben comprenderse en su contexto socioeconómico y cultural más amplio. Los autores recurren a Allison y Ellis (2001), quienes introdujeron el marco analítico del enfoque de los medios de vida sostenibles para describir en detalle los aspectos de las pesquerías en pequeña escala que es preciso considerar.

Un medio de vida puede definirse como el conjunto de capacidades, activos y actividades necesarios para garantizar el sustento de las personas (Chambers y Conway, 1992). El concepto de medios de vida sostenibles busca reunir los factores críticos, los activos y las actividades que afectan a los elementos de vulnerabilidad o la robustez de las estrategias domésticas (Allison y Ellis, 2001; Ellis, 2000). Los individuos pueden recurrir y cimentarse en cinco tipos de activos fundamentales: los activos humanos, naturales, financieros, sociales y físicos (Recuadro 1).

A los bienes se accede por conducto de las políticas y las instituciones, o por procesos tales como el mercado o las instituciones (Figura 2). Los medios de vida también son afectados por un contexto de vulnerabilidad que comprende por ejemplo las variaciones estacionales y los cambios en los precios del combustible (Allison y Horemans, 2006).

Este marco y la perspectiva según la cual las pesquerías son sólo uno de una multiplicidad de sectores a que recurren los individuos, hogares o comunidades para asegurar sus medios de vida (como ocurre en muchas pesquerías continentales

RECUADRO 1

Identificación de los activos relacionados con los medios de vida según el marco de medios de vida sostenibles

Capital natural: las existencias de recursos naturales (suelo, agua, aire, recursos genéticos, etc.) y servicios medioambientales (ciclo hidrológico, sumideros de residuos contaminantes, etc.) a partir de los cuales se derivan los recursos y servicios útiles para los medios de vida.

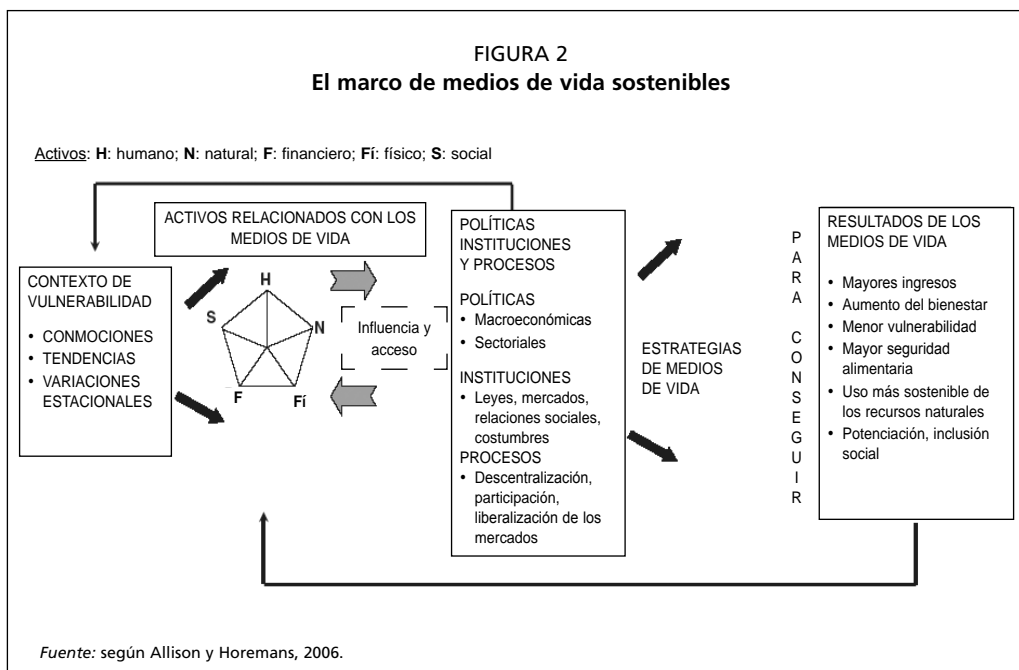
Capital físico: los activos físicos comprenden el capital que es creado por los procesos de producción económica. Dicho capital se refiere a las infraestructuras básicas y bienes de producción necesarios para sostener los medios de vida.

Capital económico o financiero: la base de capital (p. ej., efectivo, crédito/débito, ahorros y otros activos económicos) esencial para la realización de una estrategia de medios de vida.

Capital humano: las pericias, conocimientos, capacidad laboral, condiciones de salud y capacidades físicas que permiten a los sujetos llevar a cabo con éxito las diferentes estrategias de medios de vida.

Capital social: los recursos sociales (redes, demandas sociales, relaciones sociales, afiliaciones, asociaciones) a los que recurren las personas cuando llevan a cabo diferentes estrategias de medios de vida que requieren acciones coordinadas.

FIGURA 2
El marco de medios de vida sostenibles



y en pequeña escala [Smith, 2005]) ayuda a entender algunos de los vínculos que se establecen entre las pesquerías y otros sectores mayores y subraya la importancia del contexto en el que se desarrollan las pesquerías. Se consigue así un análisis más holístico de la pesca y del cambio climático, porque la pesca no es considerada en virtud de la simple relación de una comunidad con el sistema de producción acuático, sino como una parte de un sistema socioeconómico más amplio que es afectado también por el cambio climático. Puede afirmarse que el cambio climático repercute en cada uno de los cinco tipos de activos (tal como lo han examinado Allison *et al.*, 2005); y que el cambio climático modifica asimismo el contexto de vulnerabilidad y afecta las políticas, las instituciones y los procesos.

2.4 Cambio climático y variabilidad climática

Las pesquerías siempre han sido afectadas por las variaciones climáticas, especialmente por acontecimientos raros y extremos tales como las fallas en los sistemas de surgencia, los huracanes y las inundaciones. Es probable que el cambio climático se experimente como una serie de acontecimientos extremos que ocurren con una frecuencia mayor, y no como un aumento constante de las temperaturas. Por consiguiente, es justo llevar a cabo un análisis de la manera en que las pesquerías reaccionan y se adaptan a las fluctuaciones climáticas existentes. Esta suposición –es decir que el cambio climático futuro se manifestará como un aumento en la gravedad de los fenómenos conocidos– puede ser apropiada para orientar las políticas y acciones relacionadas con las repercusiones climáticas a breve plazo, pero es preciso tener presente que pueden existir umbrales o puntos de inflexión que hacen que los sistemas sociales y ecológicos se modifiquen y adopten condiciones cualitativamente diferentes, planteando problemas inéditos para la sostenibilidad y la ordenación pesquera.

2.5 Unidades y escalas del análisis

Los impactos del cambio climático, la vulnerabilidad y las medidas de adaptación se pueden examinar en relación con varios aspectos de las «pesquerías» (p. ej., la producción pesquera sostenible, el bienestar, las economías nacionales, la seguridad alimentaria o los medios de vida) y con arreglo a diversas escalas (p. ej., a escala de los países, comunidades, sectores, operaciones pesqueras, hogares o individuos). Cada uno de estos aspectos será afectado de forma distinta por el cambio climático. Por ejemplo, la interrupción de las capturas como medio de adaptación a una producción pesquera que se ha reducido podría ser vista de una cierta manera desde la perspectiva de la producción pesquera sostenible, pero de otra desde el punto de vista del bienestar de las comunidades involucradas. La escala en que se efectúan los análisis también afecta las conclusiones a las que éstos pueden conducir. Por ejemplo, las estadísticas nacionales permiten identificar los factores de vulnerabilidad de las economías frente a ciertos impactos, pero no logran discernir cuáles son, en el seno de los países, los individuos o grupos sociales vulnerables y reconocerlos como tales. Para el presente estudio, los pescadores y sus comunidades constituyen la unidad de análisis principal, y el examen de la vulnerabilidad se lleva a cabo en diversas escalas.

3. PESQUERÍAS Y MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

3.1 Contribución de las pesquerías a las emisiones de gases de efecto invernadero

Las actividades pesqueras contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tanto durante las operaciones de captura como, posteriormente, durante el transporte, elaboración y almacenamiento del pescado y éstas son en parte responsables del cambio climático. La mayor parte de los trabajos sobre la contribución de las pesquerías al cambio climático han concluido que, dada la muy escasa cuantía de las emisiones producidas por el sector de la pesca, no se justificaría prestar gran atención a las cuestiones relacionadas con la mitigación (Troadek, 2000); y que la información sobre la contribución de las pesquerías a las emisiones es escasa. Sin embargo, Tyedmers *et al.* (2005) han calculado que el consumo de combustible por las flotas pesqueras equivale al consumo de combustible total de los Países Bajos. En esta sección se analizan algunos de los cauces que siguen las emisiones y las medidas potenciales de mitigación, y se ofrecen algunos ejemplos.

3.1.1 Emisiones producidas por las operaciones pesqueras

Aunque en la mayor parte de las pesquerías se utilizan embarcaciones que de una u otra manera están dotadas de un motor alimentado por combustible fósil, las distintas pesquerías usan varios tipos de combustible. Las embarcaciones pequeñas utilizan

gasolina y de vez en cuando diésel para los motores fuera o dentro de borda, mientras que las embarcaciones de tamaño mediano usan diésel porque es un combustible menos inflamable que la gasolina. Sólo los pesqueros más grandes (de más de 1 000 toneladas) usan el combustible más contaminante para operar los motores de los cargueros de gran calado. Esto se debe a que el petróleo pesado debe ser procesado por un equipo especial antes de entrar en los motores (A. Smith, comunicación personal).

Según las estimaciones actuales, la aviación y el sector de los buques cargueros, incluidas las flotas pesqueras comerciales, producen una cantidad similar de emisiones de CO₂. En 2001, las aproximadamente 90 000 embarcaciones de más de 100 toneladas de la flota mundial consumieron cerca de 280 millones de toneladas de combustible y emitieron cerca de 813 Tg CO₂ y 21,4 Tg NO_x (un poderoso GEI) (Eyring *et al.*, 2005). En 2001 había registrados alrededor de 23 000 embarcaciones de pesca y buques factoría, que representaban alrededor del 23 por ciento de la flota pesquera mundial. Eyring *et al.* (2005) han derivado los coeficientes de emisión para estas clases de vehículos, y a partir de estos valores el presente estudio ha estimado emisiones totales de los grandes buques pesqueros –que son de alrededor de 69,2 Tg CO₂ por año– lo que representa el 8,5 por ciento de las emisiones producidas por todos los barcos de transporte de mercancías. Esta estimación es intermedia entre la estimación más alta de Tyedmers, Watson y Pauly (2005), quienes utilizaron las estadísticas FAO de capturas y el índice de eficiencia típica combustible/captura para varias pesquerías para calcular el consumo de combustible de la flota pesquera mundial en 2000, y las estimaciones de la FAO (2007a) que analizan el uso de combustible de los barcos pesqueros en 2005 (Tabla 2).

Tratándose de la posibilidad de incorporar el transporte marítimo en los sistemas de contabilidad de emisiones, las estimaciones contenidas en la Tabla 2 muestran diferencias considerables que indican claramente que es necesario proseguir las investigaciones. Algunas de las diferencias se pueden explicar por las distintas fuentes de los datos y métodos usados. Los cálculos de Eyring abarcan sólo las 23 000 embarcaciones más grandes que superan las 100 toneladas, mientras que en 2004 la flota mundial tenía 1,3 millones de embarcaciones con cubierta (FAO, 2007a, p. 25). El método utilizado por Tyedmers *et al.* abarcó todas las embarcaciones y, tal como era de suponer, los valores calculados resultaron más altos. Las estimaciones de la FAO son mucho más bajas y reflejan quizá las reducciones registradas por la flota pesquera entre 2001 y 2005. Sin embargo, las tendencias de los números de embarcaciones no explicarían estos valores considerablemente más bajos, porque las reducciones que han ocurrido en algunas zonas han sido compensadas por aumentos en otras. Por ejemplo, el número y el total de kW de potencia motriz de las embarcaciones de la Unión Europea disminuyeron en cerca del 9 por ciento (10 000 embarcaciones y alrededor de 1 millón de kW), mientras que el tamaño y la potencia de la flota china aumentaron en 7 por ciento y 9 por ciento respectivamente (34 000 embarcaciones y 1,3 millones de kW),

TABLA 2
Estimaciones del consumo de combustible y de las emisiones de CO₂ de los barcos pesqueros

Fuente	Tipo de embarcación	Año	Consumo de combustible (millones de toneladas)	Emisiones de CO ₂ (Tg)	Relación combustible/emisiones de CO ₂
Eyring (2005) (embarcaciones de >100 t solamente)	>100 t (23 000 embarcaciones)	2001	23,6 ¹	69 ¹	2,9
Tyedmers <i>et al.</i> (2005)	Todas las embarcaciones	2001	42	134	3,2
FAO (2007a)	1,3 millones de embarcaciones con cubierta	2005	14	43	3,05 ²

¹ Calculado de acuerdo con la proporción de grandes embarcaciones que son barcos factoría o barcos de captura.

² Promedio de las razones utilizadas por Eyring y Tyedmers.

Fuente: FAO, 2007a.

RECUADRO 2

Islandia: el aumento de la eficiencia energética en el sector de la pesca como estrategia de mitigación

En los países y regiones en los que las pesquerías están muy industrializadas y cuyas economías dependen del sector pesquero, las emisiones producidas por las actividades pesqueras pueden ser cuantiosas. En Islandia, la pesca y la elaboración del pescado supusieron el 40 por ciento de sus exportaciones totales, mientras que el uso de combustibles fósiles dio origen a cerca del 26 por ciento de todas las emisiones de gases de efecto invernadero. Uno de los objetivos del Gobierno de Islandia ha sido aumentar la eficiencia energética del sector mediante la educación sobre opciones de ahorro de energía, la dotación de embarcaciones nuevas de la mejor tecnología disponible y reducción en el uso de sistemas de refrigeración con hidrofluorocarbonos (HFC).

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente de Islandia (2003), <http://unfccc.int/resource/docs/natc/icenc3.pdf>

pese a los planes para hacer frente a la sobrecapacidad de esa flota. Las embarcaciones coreanas disminuyeron ligeramente en número, pero su considerable potencia motriz aumentó en cerca de 2 millones de kW (14 por ciento, FAO, 2007a, p. 27).

En algunos casos, los aparejos de pesca móviles, en especial las redes de arrastre demersales, son menos eficientes en cuanto a consumo de combustible que los aparejos estáticos (Tabla 3). No obstante, la eficiencia energética de las operaciones pesqueras debe ser examinada específicamente, porque algunos aparejos pasivos industriales pueden tener un alto coeficiente de consumo de energía. Se estimó que los costos del combustible en 2005 equivalieron a alrededor del 30 por ciento de las utilidades realizadas mediante aparejos demersales en los países desarrollados. En el mundo en desarrollo, las flotas tienden a tener menor eficiencia de combustible en términos de costos y beneficios derivados de la captura, y en esos países se gasta hasta el 50 por ciento de dichos beneficios en combustible (Tabla 3). No es posible comparar entre los consumos absolutos de combustible porque los valores son afectados por las variaciones de precios del combustible y de captura en las diferentes pesquerías y países.

La eficiencia del consumo de combustible puede verse reducida cuando la ordenación pesquera es deficiente. Algunas medidas de ordenación (p. ej., el total de capturas permitidas sin cupos individuales) pueden exacerbar la «carrera por el pescado» e incentivar el aumento de la potencia motriz. Mientras tanto, las embarcaciones que faenan en zonas sobrepescadas –cuyas poblaciones han disminuido en densidad y cuyos individuos tienen tamaños más reducidos– deben aumentar su esfuerzo pesquero, capturar un mayor número de individuos, desplazarse hacia lugares más distantes o hacia bancos más profundos y/o pescar en un área más extensa para desembarcar el mismo volumen de pescado –todo lo cual haría aumentar el consumo de combustible por tonelada de material desembarcado.

TABLA 3

Costos del combustible como proporción de los beneficios totales

	Categoría de aparejos	Costo del combustible como proporción de los beneficios totales en 2005 (porcentaje)
Países en desarrollo	Aparejos móviles demersales	52,3
	Aparejos móviles pelágicos	33,4
	Aparejos pasivos	38,7
Países desarrollados	Aparejos móviles demersales	28,7
	Aparejos móviles pelágicos	11,0
	Aparejos pasivos	9,2

Fuente: FAO, 2007a.

Nota: Los costos del combustible varían de un país a otro.

3.1.2 Mitigación de las emisiones producidas por las operaciones pesqueras

Es probable que el aumento de los costos del combustible siga presionando a la industria pesquera y que ésta deba aumentar su eficiencia en cuanto a consumo de combustible para seguir siendo rentable, recurriendo por ejemplo a embarcaciones o a aparejos más eficientes, tales como las redes de arrastre dobles en lugar de las redes únicas (Tietze *et al.*, 2005). Sin embargo, se estima que con estas prácticas el ahorro de combustible no sería mayor del 20 por ciento (FAO, 2007a). También para los pescadores en pequeña escala existen opciones de reducción del consumo de combustible, por ejemplo, mediante el aumento de eficiencia de sus embarcaciones, el uso de velas y la adopción de mejores procedimientos de pesca (Wilson, 1999).

3.1.3 Emisiones generadas por las operaciones de mercadeo

La FAO estima que en 2004, se comercializaron a nivel internacional 53 millones de toneladas de pescado (FAO, 2007a), incluidos tanto los productos provenientes de la pesca como de la acuicultura. El transporte de este pescado originó emisiones de gases de efecto invernadero. Los envíos de algunos productos pesqueros de elevado valor, tales como las importaciones de atún destinadas a Japón, se realizan frecuentemente por aire y conllevarían emisiones sumamente altas. Las importaciones de pescado transportadas por vía aérea a los Estados Unidos de América, Europa y Asia se han estimado en 200 000 100 000 y 135 000 toneladas, respectivamente (Conway, 2007). Las pesquerías pueden suponer una contribución regional significativa al transporte de carga aérea. Por ejemplo, el pescado, moluscos y crustáceos fueron los productos más frecuentemente aerotransportados desde Nueva Zelanda en 1997 (Statistics New Zealand, 2007), mientras que el 10 por ciento de toda la carga aerotransportada desde Columbia Británica en 1996 correspondió a productos pesqueros (British Columbia Stats, 1998).

Pese a los rápidos incrementos que ha conocido el transporte mundial de productos pesqueros hasta principios del decenio de 2000, los volúmenes parecen haber registrado un estancamiento. Esto puede deberse a la competencia con otras mercancías transportadas por avión, a la reticencia de las líneas aéreas a transportar pescado, y a una tendencia a transportar el pescado congelado en el punto de origen en contenedores refrigerados (Conway, 2007). Las emisiones por kilogramo del producto que se transporta por aire superan varias veces a las de los productos que viajan por mar. Saunders y Hayes (2007) han calculado los coeficientes del transporte de productos agrícolas, y estos mismos coeficientes son aplicables a las exportaciones de pescado (aunque éstas puedan ser cuantitativamente superiores cuando un volumen mayor de productos se somete a refrigeración). Las emisiones derivadas de los fletes aéreos intercontinentales de pescado pueden entonces cifrarse en 8,5 toneladas de CO₂ por kilogramo de producto, valor que equivale a 3,5 veces el de las emisiones del producto enviado por mar y a más de 90 veces al de las emisiones procedentes del transporte local del pescado, si éste es consumido dentro de los 400 km de la fuente (Tabla 4).

Suponiendo que las emisiones por kilogramo de pescado sean similares a las del producto agrícola, las 435 000 toneladas de pescado importadas en los Estados Unidos, Europa y Asia (Conway, 2007) por vía aérea darían origen a 3,7 Tg CO₂ de

TABLA 4

Emisiones de CO₂ producidas por diferentes formas de transporte de productos agrícolas

Forma de transporte y distancia		gCO ₂ /kg
Distancias cortas (<400 km)	Envíos por camión	55
Transporte internacional	Flete aéreo	8 510
	Flete marítimo	
	A granel	2 399
	No a granel	6 424

Fuente: Según Saunders y Hayes, 2007.

emisiones, cantidad que equivale aproximadamente al 3 a 9 por ciento de las emisiones operativas de CO₂ estimadas provenientes de las embarcaciones de pesca. Las emisiones derivadas del transporte no aéreo de los restantes 52,5 millones de toneladas de pescado comercializado internacionalmente dependen de la distancia y modalidad del transporte. De los datos del Tabla 4 para los fletes por camión a corta distancia y para los fletes no a granel marítimos, esta cantidad podría estar comprendida entre 3 y 340 Tg CO₂, equivalente a entre el 2 y 780 por ciento de las emisiones pesqueras operativas estimadas.

Está claro que se necesita una información más detallada sobre las formas de transporte para formular estimaciones fiables del flete de pescado, pero es posible que las emisiones que produce este sector sean tan significativas como las emisiones operativas. La contribución del sector pesquero a las emisiones de CO₂ aumentará con la continua internacionalización del comercio de pescado si el índice de eficiencia del transporte y la relación flete aéreo-flete por superficie se mantiene invariado, mientras que un uso mayor del flete marítimo a granel o el aumento del consumo local pueden traducirse en una reducción general de las emisiones producidas por el transporte de pescado.

3.1.4 Otras formas de contribución potencial de las pesquerías a la mitigación

Se ha comenzado a investigar sobre la utilización de los productos de desecho provenientes de la elaboración del pescado para la producción de biodiésel. Este combustible puede ofrecer una alternativa al uso de los combustibles fósiles o al biodiésel terrestre en casos específicos cuando se dispone de grandes cantidades de grasa de pescado. Por ejemplo, en Honduras una empresa elaboradora de tilapia genera electricidad y hace funcionar vehículos con combustible a base de grasa de desecho de pescado (Tony Piccolo, comunicación personal). Se aprovechan para este fin los productos de desecho provenientes de la elaboración industrial del pescado cultivado. Como el pescado tiene un elevado valor nutritivo, esta forma de aprovechamiento es poco deseable en las pesquerías de captura típicas, a menos que se disponga de cantidades igualmente grandes de otros desechos de productos pesqueros que suelen descartarse.

3.2 Repercusiones de las acciones mundiales de mitigación en las pesquerías

Los sectores de la aviación y de los fletes no están en la actualidad comprendidos dentro de ningún plan de comercio de emisiones. Las embarcaciones pesqueras que pescan en aguas distantes y son abastecidas de combustible fuera de las aguas territoriales no están por consiguiente incluidas en los planes y pueden también evitar los impuestos nacionales sobre el combustible. Por el contrario, las embarcaciones que pescan dentro de la zona económica exclusiva (ZEE) de sus países están sujetas a pagar impuestos sobre el combustible y a ser incorporadas en los mecanismos en vigor. Mientras se negocia el mecanismo post Kyoto de 2012, es posible que los sectores de la aviación y de los fletes entren a formar parte de dicho mecanismo (EEA, 2008), con las consiguientes implicaciones respecto a emisiones y uso del combustible de todas las embarcaciones pesqueras.

La gran mayoría de las operaciones pesqueras son vulnerables a cualquier disminución en la disponibilidad de combustible o a cualquier aumento de precios, ya que dependen por completo de los combustibles fósiles. La duplicación del precio del diésel en 2004 y 2005, por ejemplo, determinó que los pescadores debieran retirar de sus beneficios una cantidad doble para sufragar los gastos de combustible, y ello hizo que muchas operaciones pesqueras dejaran de ser rentables (FAO, 2007a).

Como el 40 por ciento de las capturas se comercializa internacionalmente (Delgado *et al.*, 2003), el aumento de los costos del transporte y de los fletes (p. ej., debido a los impuestos de carbono o a otras medidas de mitigación) afectará a los mercados y reducirá potencialmente la rentabilidad del sector. Esto podrá también afectar la

seguridad alimentaria de los países pobres importadores de pescado por aumento de los costos de importación de este producto.

4. REPERCUSIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PESQUERÍAS

4.1 Repercusiones potenciales y cauces de las repercusiones

Se espera que el cambio climático repercuta en las pesquerías por conducto de diversos cauces y agentes impulsores. La Figura 3 ilustra que los efectos del cambio climático pueden ser directos o indirectos, y resultan de procesos que tienen lugar en los ecosistemas acuáticos o que se vinculan a los sistemas políticos, económicos y sociales. Este informe se concentra en las consecuencias del cambio climático en el punto de su incidencia en las actividades pesqueras, en los pescadores y sus comunidades.

Numerosas son las potenciales repercusiones ecológicas indirectas y socioeconómicas directas e indirectas en la pesca que se han reconocido (Tabla 5, Allison *et al.*, 2005). En el primer capítulo de este informe, Barange y Perry resumen las repercusiones biofísicas en los sistemas acuáticos. Esta ha sido la orientación de la mayor parte de los estudios sobre el cambio climático y la pesca, quizá por la importancia que las ciencias naturales tienen en el ámbito de las investigaciones climatológicas y pesqueras y debido a la complejidad de las repercusiones socioeconómicas indirectas. Sin embargo, el Recuadro 3 presenta un caso en el que la fuerza de las repercusiones socioeconómicas parece haber sido superior a la de las repercusiones biofísicas y ecológicas derivadas del cambio climático, incluso en remotas comunidades de pescadores de subsistencia.

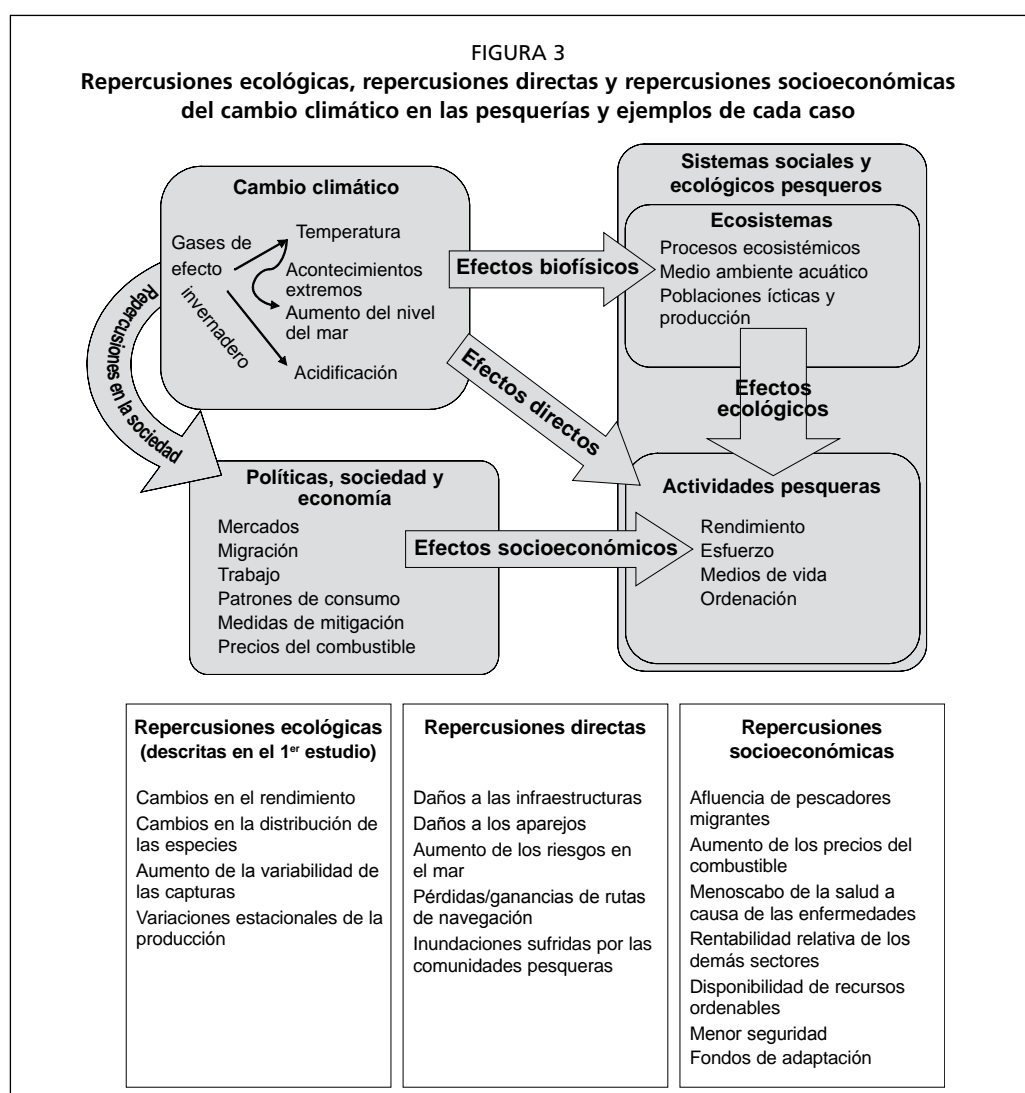


TABLA 5
Repercusiones potenciales del cambio climático en las pesquerías

Tipos de cambios	Cambios físicos	Procesos	Repercusiones potenciales en las pesquerías
Medio ambiente físico (cambios ecológicos indirectos)	Aumento de la concentración de CO ₂ y de la acidificación del océano.	Efectos en los animales calcíferos, por ejemplo moluscos, crustáceos, corales, equinodermos y ciertos tipos de fitoplancton.	Reducción potencial de la producción de los recursos calcíferos marinos y especies ecológicamente afines y disminución de los rendimientos.
	Calentamiento de las capas superiores del océano.	Las especies de aguas templadas reemplazan a las de aguas frías.	Desplazamiento hacia el polo norte y el polo sur de las zonas de distribución del plancton, de invertebrados, de peces y de aves, reducción de la diversidad de especies en las aguas tropicales.
		Las especies de plancton se desplazan hacia latitudes más altas.	
		Modificación del calendario de floración del fitoplancton. Modificación de la composición del fitoplancton.	Posible desfase entre la presa (plancton) y el depredador (poblaciones icticas), y reducción de la producción y biodiversidad y mayor variabilidad de los rendimientos.
	Subida del nivel del mar.	Pérdida de hábitats de cría de peces costeros, por ejemplo, manglares, arrecifes de coral.	Producción y rendimiento reducidos de las pesquerías costeras y de pesquerías afines.
Poblaciones icticas (cambios ecológicos indirectos)	Aumento de la temperatura del agua.	Cambios en la proporción de sexos. Alteración de la fecha de desove. Alteración de los periodos migratorios. Alteración de los periodos de abundancia máxima.	Alteración de la cronología y reducción de la productividad en todos los sistemas marinos y de aguas dulces.
	Modificación de las corrientes oceánicas.	Aumento de especies invasivas, enfermedades y proliferación de algas.	Reducción de la productividad de las especies objetivo en los sistemas marinos y de aguas dulces.
		Cambios en los resultados del reclutamiento de peces.	Abundancia de peces juveniles afectados y consiguiente reducción de la productividad en las aguas marinas y en las aguas dulces.
Ecosistemas (cambios ecológicos indirectos)	Reducción de los flujos hídricos y aumento de las sequías.	Variaciones en el nivel de los lagos. Variaciones en los flujos mínimos en los ríos.	Reducción de la productividad de las pesquerías lacustres. Reducción de la productividad de las pesquerías fluviales.
	Mayor frecuencia de los fenómenos de oscilación meridional El Niño.	Cambios en la periodicidad y latitud de los fenómenos de surgencia.	Cambios en la distribución de las pesquerías pelágicas.
		Descoloramiento y muerte de los corales.	Reducción de la productividad de las pesquerías en arrecifes de coral.
Perturbaciones de las infraestructuras costeras y en las operaciones pesqueras (cambios directos)	Aumento del nivel del mar.	Cambios en el perfil de las costas, pérdidas de puertos y viviendas.	Mayor vulnerabilidad de las comunidades e infraestructuras costeras a marejadas ciclónicas y a las alteraciones del nivel del mar.
		Mayor exposición de las zonas costeras a los daños ocasionados por las tormentas.	Los costos de adaptación se traducen en una rentabilidad menor; los riesgos de daños ocasionados por las tormentas hacen aumentar las primas de seguros y/o los costos de reconstrucción.
	Tormentas más frecuentes.	Más jornadas de pesca perdidas a causa del mal tiempo, mayor riesgo de accidentes.	El aumento de los riesgos asociados con la pesca hace que la pesca se convierta en un medio de subsistencia menos viable para los pobres.
		Las instalaciones acuícolas (estanques costeros, jaulas marinas) son más propensas a daño o destrucción.	Reducción de la rentabilidad de las empresas en escala más grande, aumento de las primas de seguros.
Pesca continental y medios de vida (cambios socioeconómicos indirectos)	Variación en los niveles de precipitación.	En las zonas donde la pluviosidad disminuye, se reducen las oportunidades para la agricultura, la pesca y la acuicultura como sistemas de subsistencia rural.	Reducción de la diversidad de los medios de vida rurales; mayores riesgos para la agricultura; mayor dependencia de los ingresos no agrícolas. Desplazamiento de las poblaciones hacia las zonas costeras y afluencia de nuevos pescadores.
	Mayor frecuencia de sequías o inundaciones.	Daños a los activos de producción (estanques piscícolas, presas, arrozales, etc.) y a las viviendas.	Mayor vulnerabilidad de los hogares y comunidades situados en zonas ribereñas y en llanos inundables.
	Menor predictibilidad de las estaciones lluviosas o secas.	Menores posibilidades de planificar las actividades que aseguran los medios de vida, por ejemplo, estacionalidad de las actividades agrícolas y la pesca.	

Fuente: Adaptado de Allison et al., 2005.

RECUADRO 3

Importancia de los factores socioeconómicos en las comunidades pesqueras de Fiji

Las islas Lau están situadas en una provincia sudoriental remota de Fiji y tienen escasas carreteras y medios de transporte. En estas islas, más que en otras partes de Fiji, la vida sigue pautas muy tradicionales y la mayoría de los hogares se dedica a la pesca de subsistencia.

Tras un episodio de mortalidad masiva de corales provocada por las alteraciones de la temperatura en 2000 y un brote de estrellas de mar corona-de-espinas (*Acanthaster planci*) que ocasionó daños a las formaciones coralíferas en 1999, se podía esperar que las pesquerías y comunidades locales que hacen uso de esos arrecifes hubieran sufrido repercusiones directas. Sin embargo, una encuesta socioeconómica realizada en la zona en 2006 reveló que si bien algunos pescadores estaban al tanto del fenómeno de descoloramiento de los corales y de la invasión de coronas de espinas, pocos creían que estos eventos representasen una amenaza para las poblaciones de peces. La mayor parte de los pescadores no había constatado que la pesca hubiese mermado y por consiguiente ningún pescador había ajustado sus prácticas de pesca. Pese a la lejanía de estas comunidades y al hecho de que sus miembros practicasen una pesca de subsistencia, el mayor cambio que habían experimentado sus medios de vida derivó de una oportunidad de exportar artículos artesanales (cuencos ceremoniales tallados) y no de los impactos ecológicos producidos por el clima que habían causado el blanqueamiento de los corales y el brote de estrellas de mar.

Este caso se basa en una encuesta relativamente pequeña realizada en un grupo de islas específico, y no debe conducir a deducciones generalizadoras; pero ilustra que la suposición de que en las pesquerías de subsistencia los factores biofísicos y ecológicos sean agentes determinantes de las conductas laborales y sociales puede ser engañosa.

Fuente: Turner *et al.*, 2007.

4.2 Repercusiones por sector

4.2.2 Pesquerías marinas en pequeña escala y artesanales

El sector de la pesca en pequeña escala es susceptible a diversas repercusiones ecológicas indirectas según el sistema ecológico en que se basa la pesquería. Por ejemplo, los arrecifes de coral son, en todo el Atlántico occidental, el océano Índico y el océano Pacífico, una zona que sustentan pesquerías en pequeña escala. Los arrecifes están en situación de riesgo debido a la elevación de la temperatura y a la acidificación de las aguas, además de peligrar a causa de otros efectos locales más directos (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). El grave riesgo de blanqueamiento y mortalidad de los corales a causa de la subida de la temperatura superficial representa una amenaza para la productividad de estas pesquerías. El área de distribución de los arrecifes de coral, que coincide con la distribución geográfica de amplias poblaciones de países en desarrollo en Asia sudoriental, África oriental y por todo el Pacífico, indica que la subsistencia de muchos millones de pescadores de pequeña escala dependen de los arrecifes de coral (Whittingham, Campbell y Townsley, 2003a). Los hábitats y humedales próximos a la costa, tales como los manglares y las praderas submarinas –que a menudo son las zonas en donde se practica la pesca en pequeña escala o que pueden ser zonas de cría de especies importantes– son susceptibles a sufrir las repercusiones de la subida del nivel del mar, en especial cuando el desarrollo costero ha limitado la expansión del ecosistema en zonas cercanas a la costa (Nichols *et al.*, 2007a).

Debido a su escasa movilidad, los pescadores en pequeña escala suelen no están en condiciones de adaptarse y seguir a las especies que han modificado sus zonas de distribución en respuesta al cambio climático. Las instituciones tradicionales que garantizan el derecho de acceso a los recursos zonales tendrán que enfrentar las

contingencias derivadas de la pérdida o de la reubicación de los recursos locales. No obstante, si bien algunos pescadores verán que sus especies objetivo han desaparecido, otros advertirán que los desembarques de especies de alto valor comercial aumentan. Por ejemplo, en el sistema de la Corriente de Humboldt durante los años de El Niño los desembarques de camarón y pulpos aumentan en el norte de Perú, mientras que en el sur las aguas templadas tropicales favorecen el incremento de los desembarques de vieiras. Estas especies tienen mayor valor comercial que las tradicionales y los mercados internacionales las demandan (Badjeck, 2008).

Además, los aportes de agua dulce a los estuarios pueden contribuir a la aparición en esas zonas de especies de aguas salobres. Por ejemplo, durante El Niño de 1997 a 2000, en Perú septentrional las pautas de salinidad se modificaron a causa del aumento de las lluvias, favoreciendo la pesquería de la lisa (*Mugil cephalus*) (Badjeck, 2008); y durante La Niña de 1999 a 2000 en Colombia se disparó la pesca de la tilapia a causa de los cambios de salinidad del agua (Blanco, Narváez Barandica y Villoria, 2007).

Los pescadores de pequeña escala están particularmente expuestos a las repercusiones directas del cambio climático porque viven por lo general en las aldeas más cercanas al mar; las propiedades e infraestructuras corren por lo tanto el riesgo de ser dañadas por factores destructivos directos como la subida del nivel del mar y el aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas. Las tormentas también agudizan los peligros que conllevan las faenas marítimas, y los cambios en los patrones climáticos pueden alterar las prácticas pesqueras fundadas en un conocimiento tradicional del clima y las corrientes marinas locales.

Los trastornos provocados por sucesos extremos que afectan a otros sectores (p. ej., la agricultura, el turismo, las manufacturas) pueden tener efectos socioeconómicos indirectos. La mano de obra desplazada que llega al sector de la pesca puede desencadenar conflictos laborales relacionados con las oportunidades de empleo y aumentar la presión pesquera. Este efecto fue observado tras los huracanes que asolaron el Caribe (Mahon, 2002). Las sequías y subsecuentes pronósticos de fracaso de la agricultura en algunas zonas del África subsahariana (Conway *et al.*, 2005) pueden conducir a los denominados “refugiados ambientales” a trasladarse a zonas costeras creando una afluencia de mano de obra de pesca excedente.

Los medios de vida de los pescadores en pequeña escala ya son vulnerables a diversos riesgos no climáticos, tales como las fluctuaciones en los recursos, la pérdida de acceso a los recursos, el VIH/SIDA, las variaciones en los mercados, los conflictos, la marginalización y la deficiente gobernanza (Allison, Beveridge y van Brakel, 2008). A las condiciones de inestabilidad que inhiben las inversiones en proyectos pesqueros estratégicos sostenibles de largo plazo se sumarán, extremándolas, los factores de inseguridad resultantes del cambio climático. Además, los pescadores en pequeña escala carecen por lo general de cobertura de seguro.

4.2.3 *Pesquerías marinas en gran escala*

Muchas de las mayores pesquerías del mundo (en particular, la pesquería de la anchoveta peruana [*Engraulis ringens*], que supone más del 10 por ciento de los desembarques mundiales) están situadas en ecosistemas de surgencia y son por consiguiente sumamente vulnerables a los cambios que afectan al clima y a las corrientes. Las capturas anuales de anchoveta peruana, por ejemplo, han registrado fluctuaciones de entre 1,7 y 11,3 millones de toneladas durante la última década en respuesta a las alteraciones ocasionadas por el fenómeno de El Niño.

Los cambios en gran escala afectan a la distribución de las especies y, por tanto, a los sistemas productivos. Por ejemplo, el pronosticado desplazamiento hacia el norte de las poblaciones de atún (Miller, 2007) puede entorpecer el funcionamiento de las industrias elaboradoras de pescado porque las infraestructuras existentes ya no estarán lo suficientemente cerca de los nuevos bancos pesqueros. Por lo demás, los cambios en

la distribución de las poblaciones y de las capturas pueden ocurrir de uno y otro lado de las fronteras nacionales.

En el contexto del cambio climático, la carencia de límites definidos y estables de los recursos plantea particulares dificultades para la gobernanza pesquera. Los cambios en la distribución de las especies de peces y las fluctuaciones en la abundancia de las especies convencionales y de las especies «nuevas» pueden obstaculizar los acuerdos sobre los acuerdos de asignación vigentes. Por ejemplo, los cambios en las áreas de distribución del salmón del Pacífico resultantes de las variaciones de temperatura de la superficie del mar y de los patrones de circulación han conducido a conflictos relacionados con los acuerdos de ordenación entre los Estados Unidos de América y Canadá (Tratado del salmón del Pacífico, Miller, 2000). Igualmente, se pronostica que los cambios de temperatura en las Islas del Pacífico podrían determinar una redistribución espacial de los recursos de atún hacia latitudes más altas en el océano Pacífico, y que esto podría acarrear conflictos respecto a las existencias de atún entre flotas industriales extranjeras y flotas nacionales, puesto que el ámbito de operaciones éstas últimas se limita a sus respectivas ZEE (Banco Mundial, 2000). Estos problemas también se pueden plantear a escala subnacional entre jurisdicciones locales, las áreas tradicionales de ordenación o los sistemas de derechos territoriales.

La efectividad de herramientas de ordenación espacial rígida, tales como la declaración de áreas de veda permanente con el objeto de proteger las zonas de cría o de migración, los planes de ordenación basados en los límites de las ZEE o los planes de ordenación de la pesca transfronteriza también pueden quedar anulada si la estacionalidad de las especies objetivo (p. ej., temporadas de veda) sufre variaciones en respuesta a la alteración de los regímenes climáticos.

Las pesquerías industriales también están sujetas a repercusiones directas producidas por el cambio climático como la elevación del nivel de los mares y la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos. Así como sucede con las pesquerías en pequeña escala, las operaciones pesqueras pueden ser alteradas directamente por el mal tiempo, mientras que los acontecimientos extremos pueden perjudicar las embarcaciones y las infraestructuras en tierra firme. Los puertos urbanos y las instalaciones para grandes buques también pueden verse afectados. Un número cada vez mayor de ciudades costeras corre peligro de ser perjudicado por la subida del nivel del mar y los episodios atmosféricos extremos, en especial en las economías asiáticas en rápido desarrollo (Nicholls *et al.*, 2007a).

Entre los impactos indirectos en las pesquerías industriales están las inundaciones o los problemas relacionados con la salud de poblaciones vulnerables, que pueden afectar al empleo, a los mercados o a las plantas de elaboración. El sector de la acuicultura es uno de los principales mercados para la harina de pescado procedente de la pesca de captura, y los efectos del cambio climático pueden repercutir en los mercados de transformación de productos pesqueros; sin embargo, las proyecciones actuales indican que la demanda de harina y aceite de pescado continuará aumentando en el futuro cercano (Delgado *et al.*, 2003).

Para algunas pesquerías puede haber repercusiones positivas indirectas debidas al descenso de actividad en otras pesquerías que compiten por una porción de los mercados mundiales. Por ejemplo, mientras que las pesquerías que operan en la zona de surgencias oriental del Pacífico se vieron perjudicadas durante los años de El Niño, las pesquerías danesas recibieron casi los precios más altos por el espadín del Báltico (*Sprattus sprattus balticus*), una especie competidora en el sector de la producción de harina (MacKenzie y Visser, 2001).

4.2.4 Pesquerías continentales

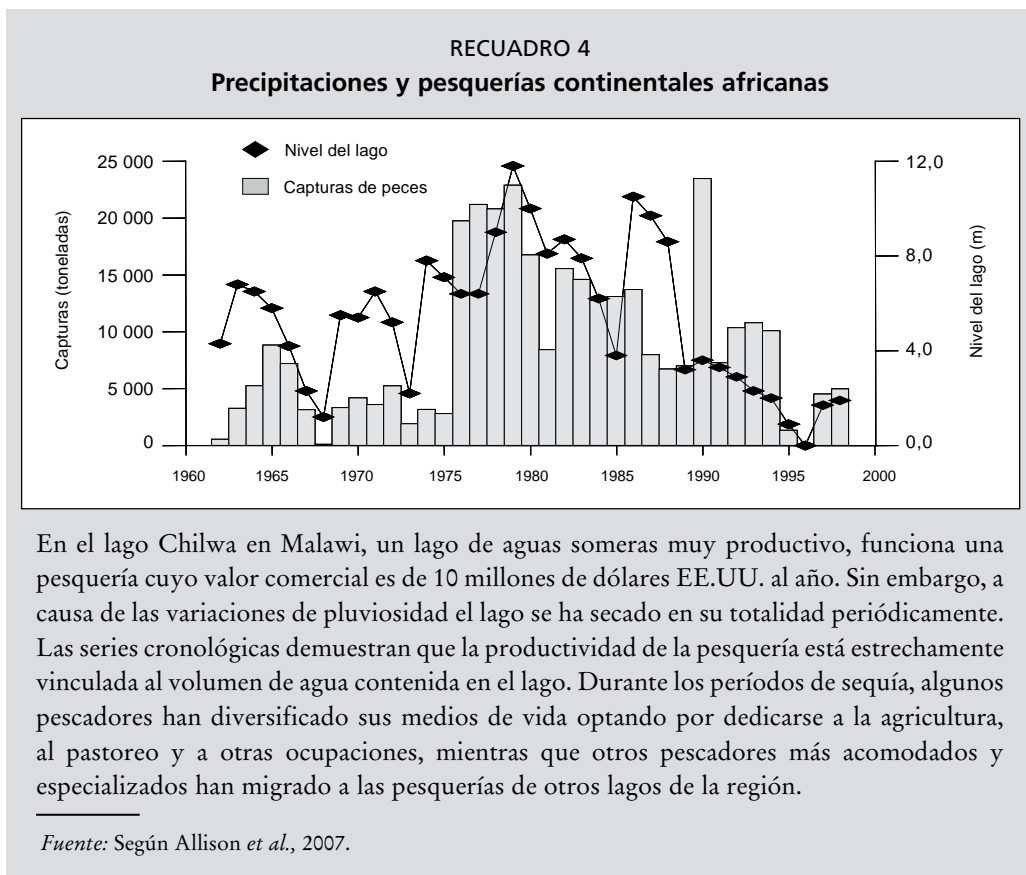
Las alteraciones climáticas pueden ocasionar cambios en las precipitaciones y en la escorrentía y afectar profundamente la ecología de las pesquerías continentales. Las

pesquerías lacustres en el África meridional, por ejemplo, sufrirán probablemente con mucha fuerza los efectos del descenso del nivel de los lagos y la disminución de las capturas (Recuadro 4).

En las cuencas hidrográficas donde se espera que la escorrentía y las tasas de descarga aumenten, la inundación estacional de las llanuras fluviales, como las de la cuenca del Ganges en Asia meridional, determinará que el rendimiento ictiológico pueda incrementarse debido a la explotación por especies migratorias laterales de zonas efímeras de desove y de alimentación más extensas. En Bangladesh, un aumento del 20 al 40 por ciento de las áreas inundadas podría elevar los rendimientos anuales en 60 000 a 130 000 toneladas (Allison *et al.*, 2005). Sin embargo, si bien las tasas de descarga y las áreas inundadas de muchos ríos en Asia meridional y sudoriental puedan aumentar, se predice a menudo que los flujos disminuirán durante las estaciones secas; y la biomasa explotable es más susceptible a las condiciones ambientales secas que a las que prevalecen durante la temporada de inundaciones (Halls, Kirkwood y Payne, 2001). Por lo tanto, los incrementos de rendimiento producidos por el aumento de las inundaciones pueden verse contrarrestados por las disminuciones que tienen lugar durante la estación seca. Además, los cambios en el régimen hidrológico y el riesgo de sequías y de inundaciones pueden representar incentivos suplementarios para las inversiones en grandes obras de construcción de infraestructuras tales como las barreras de protección contra las inundaciones, las presas hidroeléctricas y los proyectos de irrigación, que se sabe tienen interacciones complejas (y a menudo negativas) con la pesca (véase p. ej. Shankar, Halls y Barr, 2004).

4.3 Repercusiones en el mercado y en los intercambios comerciales

Las repercusiones del clima pueden afectar directamente a las actividades de elaboración pesquera y a los intercambios comerciales en el sector de las pesquerías. Por ejemplo, después del huracán *Katrina*, los pescadores de la zona del Misisipi en los Estados



Unidos de América no consiguieron vender o capturar pescado, o comprar combustible o hielo (Buck, 2005); mientras que, en 1998, las fuertes lluvias que cayeron en Perú interrumpieron las carreteras impidiendo el acceso de las comunidades rurales de pescadores a sus mercados habituales (Broad, Pfaff y Glantz, 1999).

La mayor frecuencia de los fenómenos de proliferación de algas, la intoxicación por consumo de crustáceos y pescados con ciguatera, las alteraciones ecológicas y la incidencia de patógenos humanos transmitidos por el agua, por ejemplo el *Vibrio* en las zonas afectadas por inundaciones, pueden conducir a la gente a temer el consumo de pescado contaminado. Estos factores pueden afectar negativamente los mercados de pescado (Patz, 2000; Hales, Weinstein y Woodward, 1999); sin embargo, el alcance de este tipo de repercusiones es aún incierto.

4.4 Potenciales repercusiones positivas

Además de las repercusiones negativas, el cambio climático podría crear posiblemente oportunidades y tener efectos positivos en algunas pesquerías, aunque en la literatura éstos no han sido bien entendidos ni descritos adecuadamente. En el primer capítulo de este informe, Barange y Perry destacan varios mecanismos en virtud de los cuales la producción pesquera puede incrementarse o pueden desarrollarse nuevas pesquerías.

En las aguas continentales, la creación de pesquerías por aumento de las áreas inundadas puede compensar parcialmente las pérdidas de tierras dedicadas a la agricultura o a otras actividades económicas. En Perú, el aumento de la temperatura de la superficie del mar perjudica a las pesquerías pelágicas artesanales, pero al mismo tiempo atrae a inmigrantes tropicales o subtropicales y ocasiona la expansión de la zona de distribución de algunas especies; esto ilustra cómo el cambio climático podría generar nuevas oportunidades para los pescadores y sus comunidades. En efecto, durante los fenómenos de El Niño de 1982 a 1983 y de 1997 a 1998, aparecieron en Perú camarones peneidos y langostas de roca provenientes de la Provincia Panámica (Arntz, 1986; Arntz *et al.*, 2006). Estas especies, junto a los dorados (*Coryphaena hippurus*; *mahi-mahi*), atunes y tiburones diamante o marrajo dientuso (*Isurus oxyrinchus*) crearon nuevas oportunidades para el sector de la pesca artesanal (CAF, 2000).

Un caso extremo sería la creación de una pesquería enteramente nueva en aguas abiertas resultante del deshielo del océano Ártico. La ordenación de las pesquerías aún no existentes, para las cuales no existen acuerdos estipulados de gobernanza plantea desafíos porque se enfrentan situaciones de incertidumbre y se carece de experiencia; pero esta circunstancia representa también una oportunidad de diseñar medidas de gobernanza y de ordenación con límites precautorios antes de que se desarrolle una situación de sobrecapacidad. La capacidad de adaptación de las economías, sectores pesqueros, comunidades, individuos y sistemas de gobernanza determinará hasta qué punto será posible aprovechar las oportunidades generadas por las pesquerías nuevas.

4.5 Repercusiones observadas y repercusiones futuras

4.5.1 Repercusiones observadas del cambio y de la variabilidad climática

Se sabe que el control de la actividad de muchas pesquerías depende estrechamente de efectos ecológicos que derivan de la variabilidad climática (véase un ejemplo en el Recuadro 5). Mientras tanto, en los ecosistemas marinos se han observado cambios duraderos relacionados con el clima (IPCC, 2007), por ejemplo en las poblaciones de peces objetivo. Sin embargo, a pesar de los cambios ecológicos que ya se han registrado, las repercusiones que ha experimentado la pesca deben aún ser distinguidas en gran medida de fenómenos preexistentes de variabilidad y de repercusiones no atribuibles a efectos climáticos (la sobreexplotación, las fluctuaciones de mercado, etc.). Incluso en el caso de pesquerías que se desarrollan en zonas de arrecifes coralíferos que han sufrido variaciones profundas atribuibles al cambio climático, queda por demostrar que tales repercusiones hayan podido tener efectos significativos (véase el Recuadro 6).

RECUADRO 5

Repercusiones de la variabilidad climática en las pesquerías de anchoveta peruana

Más del 95 por ciento de las capturas pesqueras peruanas, en las que dominan los recursos pelágicos tales como la anchoveta (*Engraulis ringens*), es desembarcado por el sector industrial (Majluf, Barandearan y Sueiro, 2005). Este es, por añadidura, el segundo mayor sector generador de divisas después del minero, y sus exportaciones están valoradas en 1 124 millones de dólares EE.UU. (FAO, 2003b). Sin embargo, la cosecha de la anchoveta puede experimentar una gran variabilidad debido a que, durante las fases templadas de la oscilación meridional El Niño, las poblaciones acusan fluctuaciones.

Los acontecimientos de El Niño ocasionan una reducción de los fenómenos de surgencia a lo largo de las costas peruanas y repercuten en los procesos naturales de aporte de nutrientes causando un descenso significativo de la biomasa de anchoveta. Durante El Niño de 1998, la biomasa de anchoveta fue estimada en 1,2 millones de toneladas, el volumen más bajo registrado en el decenio de 1990 (Ñiquen y Bouchon, 2004). Durante El Niño de 1997 a 1998, los volúmenes totales desembarcados disminuyeron en el 55 por ciento, en comparación con los del año 1996 (CAF, 2000). Se ha calculado que el costo directo de este decremento para el sector pesquero ha sido de 73,7 millones de soles peruanos (PEN) o 26,3 millones de dólares EE.UU. (al tipo de cambio de 1998), con un efecto negativo en la balanza de pagos nacional de cerca de PEN8,4 millones (CAF, 2000). Perú es el mayor productor mundial de harina y aceite de pescado, y las fluctuaciones en las poblaciones de anchoveta no sólo producen trastornos a nivel nacional sino que repercuten también en los mercados mundiales de piensos acuícolas.

Mientras que el sector de la pesca industrial se veía perjudicado por la reducción de las poblaciones de anchoveta y de sardina en las áreas de surgencia del Pacífico oriental, los pescadores daneses recibían precios casi sin precedentes por el espadín del Báltico, una especie que en el sector de la harina de pescado es competidora de la anchoveta (MacKenzie y Visser, 2001). La variabilidad climática en Perú no siempre es sinónimo de efectos negativos para la industria de la harina de pescado; los fenómenos de La Niña (descenso de las temperaturas de la superficie del mar) han conducido a incrementos en las capturas de anchovetas y se han traducido en beneficios para el sector industrial (Ordinola, 2002).

Aunque se ha constatado que el pH del océano ha descendido en 0,1 unidades desde 1750, no se ha observado aún que las repercusiones de la acidificación hayan sido significativas para la pesca (Nicholls *et al.*, 2007b), aunque los pronósticos a largo plazo son alarmantes (Orr *et al.*, 2005).

A través de todo el mundo, las zonas costeras se están erosionando (Nicholls *et al.*, 2007b), y los consiguientes peligros de inundaciones y pérdidas de ecosistemas representan amenazas para las comunidades costeras. Varios procesos, entre ellos el cambio de uso de las tierras, son responsables de estas alteraciones. No obstante, la erosión también puede agravarse por el efecto de la subida del nivel del mar, inducida por los cambios climáticos, aunque debido a la complejidad de la dinámica de las costas resulta difícil aislar la incidencia de la acción del clima (Nicholls *et al.*, 2007b).

4.5.2 Otras repercusiones probables que pueden tener lugar durante los próximos 50 años

Las tendencias climáticas existentes se intensificarán en el curso del próximo siglo (IPCC, 2007) y se espera que sus repercusiones serán más severas en los ecosistemas acuáticos, manifestándose tanto directa como indirectamente en la pesca, en los mercados y en las comunidades. La pérdida de corales por descoloramiento ocurrirá

RECUADRO 6

Repercusiones del descoloramiento de los corales en las pesquerías del océano Índico occidental

El descoloramiento de los corales es un fenómeno biológico que determina que, a causa de factores de estrés (en especial las temperaturas del agua excepcionalmente altas), los corales pétreos y otros organismos con ellos asociados se despojen de las algas simbióticas que normalmente se encuentran en sus tejidos. Como resultado de estos cambios, los corales se blanquean; pueden recuperarse pero también morir si el descoloramiento es grave o prolongado.

Los corales de los arrecifes de la región del océano Índico occidental experimentaron un agudo descoloramiento y mortalidad debidos al fenómeno de El Niño de 1998 a 1999, y sufrieron un nuevo blanqueamiento en 2005. En los arrecifes internos de las Seychelles las consecuencias ecológicas fueron graves. La cubierta de corales vivos disminuyó de 27 por ciento a 3 por ciento, y los peces que se alimentan de corales desaparecieron (Graham *et al.*, 2006). No obstante, las repercusiones del fenómeno de descoloramiento en las estadísticas de desembarques y en las encuestas sobre biomasa de las especies objetivo quedarían aún por demostrar (Grandcourt y Cesar 2003; Graham *et al.*, 2007). Esto puede deberse a que la estructura de los corales muertos aún proporcionó hábitats para los peces. Posteriormente, las estructuras coralíferas comenzaron a erosionarse y su masa disminuyó. En estudios ecológicos emprendidos en 2005 se constató una reducción en los índices de abundancia de peces pequeños. Este fenómeno puede apuntar a que el descoloramiento ha tenido efectos retardados en las especies de peces comercialmente importantes, y a que la erosión de los corales muertos terminó afectando los índices de reclutamiento de estas especies (Graham *et al.*, 2007).

probablemente durante los próximos 50 años, con efectos consiguientes en la productividad de las pesquerías de arrecifes y, potencialmente, en las condiciones de protección de las costas a medida que los arrecifes se degradan. El nivel de los mares continuará subiendo y para 2100 habrá aumentado en otros 20 a 60 cm, lo que supondrá niveles del mar sumamente altos, mayores riesgos de inundaciones y disminución acentuada de hábitats costeros.

Además de los cambios progresivos en las tendencias existentes, los sistemas sociales y ecológicos complejos, tales como las zonas costeras y las pesquerías, pueden manifestar modificaciones cualitativas repentinas de comportamiento cuando ciertas variables de forzamiento superan determinados umbrales (Scheffer *et al.*, 2001; Lenton *et al.*, 2008). Aparte de este comportamiento no lineal de los sistemas, la suposición de que los cambios ocurren de forma gradual descansa en una comprensión incompleta de algunos mecanismos que pueden dar origen a cambios más acelerados.

Por ejemplo, el IPCC estimó inicialmente que la capa de hielo de Groenlandia podría tomar más de 1 000 años en derretirse, pero observaciones recientes sugieren que el proceso ya está ocurriendo más rápido debido a los mecanismos de colapso de hielo que no fueron incorporados en las proyecciones (Lenton *et al.*, 2008). Análogamente, las predicciones de cambios que afectarán a los sistemas sociales y ecológicos relacionados con las pesquerías pueden fundarse en un conocimiento inadecuado de mecanismos y «elementos de inflexión» que ocasionan virajes sorpresivos o irreversibles. El cambio climático podría, por consiguiente, dar lugar en los sistemas costeros a transformaciones bruscas, sorpresivas e irreversibles (Nicholls, 2007). El tristemente famoso caso de desplome de la pesquería del bacalao del norte en el Atlántico noroccidental sirve como ejemplo (no climático) ilustrativo de una práctica de sobrepesca crónica que condujo a la pérdida súbita, inesperada e irreversible de la producción de esa pesquería. Por lo tanto, las observaciones de fenómenos existentes de tendencia no lineal no han de ser

usadas para predecir con fiabilidad las repercusiones que podrán producirse durante los próximos 50 años.

4.5.3 *Repercusiones del cambio climático en el contexto de otras tendencias*

Es preciso considerar las repercusiones futuras del cambio climático en la pesca a la luz de las muy grandes transformaciones que se pueden esperar ocurran, sin tener en cuenta el cambio climático, en el seno de la sociedad, por ejemplo en los mercados, la tecnología y la gobernanza (García y Grainger, 2005). Este contexto en evolución de las pesquerías significaría que las repercusiones del cambio climático no pueden pronosticarse analizando la forma en que los sistemas pesqueros, en su estado actual, puedan ser afectados por los cambios climáticos futuros. Es probable que a futuro, el cambio climático actúe sobre la pesca según pautas distintas a las actuales. Por ejemplo, si para la gestión del ecosistema se implantan en el futuro medidas incentivadoras y participativas que perfeccionarán la ordenación pesquera y si las disposiciones de manejo se cumplen más adecuadamente (Hilborn *et al.*, 2003), las poblaciones ícticas estarán mejor armadas para resistir los impactos biofísicos que puedan sufrir los mecanismos de reclutamiento, y los ecosistemas pesqueros manifestarán mayor resiliencia ante los cambios.

En un mundo en el que la demanda de pescado se intensifica, los precios registran aumentos y las pesquerías conocen una mayor globalización (Delgado *et al.*, 2003), las pesquerías comerciales podrían mantener su rentabilidad pese a rendimientos menguantes. Sin embargo, en los países más pobres las pesquerías de subsistencia y los mercados locales pueden volverse más susceptibles a la demanda económica proveniente de países ricos; y al destinar un mayor volumen de la producción a las exportaciones, la contribución de la pesca a la seguridad alimentaria puede disminuir en los países pobres.

4.5.4 *Repercusiones sinérgicas*

La literatura sobre las repercusiones del cambio climático (incluido el presente informe) tiende necesariamente a enumerar por separado los factores de impacto; pero es importante saber que existen potenciales efectos sinérgicos acumulativos de los impactos múltiples (véase por ejemplo el Recuadro 7).

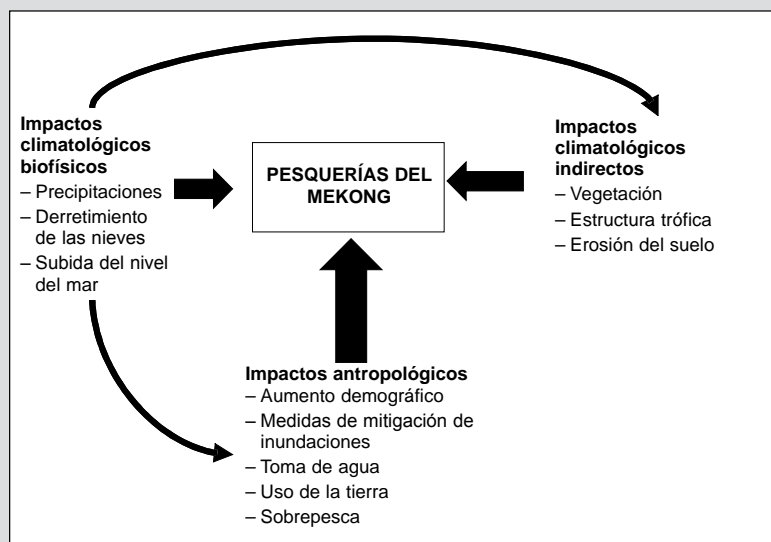
4.5.5 *Incertidumbre de las repercusiones*

Si bien los sucesivos informes del IPCC han documentado, con mayor certeza científica, que el cambio climático ya está teniendo lugar y que sus repercusiones observadas son cada vez más numerosas, sigue habiendo mucha incertidumbre sobre el alcance, magnitud, ritmo y dirección de los cambios e impactos. Al mismo tiempo, y a diferencia de lo que ocurre respecto de los sistemas terrestres que sirven de sostén a las actividades agrícolas, las predicciones sobre los efectos climáticos en los sistemas acuáticos son cuantitativamente escasas (Easterling *et al.*, 2007). La importancia relativa de las diferentes repercusiones y sus interacciones potenciales son muy imperfectamente entendidas, y la incertidumbre de los pronósticos de las variables climáticas es amplificada por la deficiente comprensión de las respuestas de los sistemas biofísicos. Otro factor de complejidad e imprevisibilidad es la forma en que los individuos y las economías –y sus relaciones múltiples con los ecosistemas locales– pudieran responder al cambio (Allison, Beveridge y van Brakel, 2008, Figura 4). Esto indica cuán necesario es que sociólogos, economistas y naturalistas intervengan en el proceso de recomendación de políticas y en la ordenación. También enfatiza que es fundamental diseñar regímenes de gobernanza pesquera suficientemente flexibles – adaptables a los cambios imprevistos– y aptos para educar a quienes los implementen. Con esta finalidad se han elaborado marcos conceptuales como la cogestión adaptativa (Armitage *et al.*, 2008) que si bien son bastante flexibles no han sido aún ensayados en gran escala.

RECUADRO 7

Factores de impacto múltiple en las pesquerías del delta del Mekong

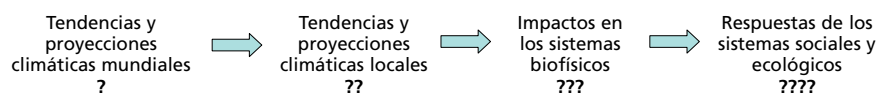
El delta inferior del Mekong alberga más de un millar de especies de peces y sostiene una pesquería de captura de 1,5 millones de toneladas y medios de vida para 40 millones de personas basados en la pesca. Estas pesquerías se ven amenazadas por diversos procesos relacionados con el clima, entre los cuales están las variaciones en los patrones de precipitación, el derretimiento de las nieves y la subida del nivel del mar; estos fenómenos repercuten en varios aspectos de la ecología del delta y en los asentamientos humanos.



Además de la interacción de estos impactos climáticos, las mayores repercusiones sobre las pesquerías que se desarrollan en el delta provienen de actividades humanas, incluida la sobrepesca, el cambio de uso de la tierra y los trastornos hidrológicos. El aumento de las inundaciones puede, en el futuro, determinar mayores rendimientos pesqueros, pero las medidas de mitigación de inundaciones ya planificadas para proteger la agricultura podrían traducirse en rendimientos contenidos, puesto que la extensión de los terrenos inundados será menor.

Fuente: Easterling *et al.*, 2007.

FIGURA 4

Aumento de la incertidumbre a lo largo de la vía de impactos del cambio climático**4.6 Vulnerabilidad de las regiones, de los grupos sociales y de zonas conflictivas**

Las repercusiones del cambio climático tendrán efectos desiguales en las diferentes zonas geográficas, países, grupos sociales e individuos. La vulnerabilidad no depende tan sólo de la distribución de los impactos climáticos (exposición), sino de la susceptibilidad y capacidad de adaptación de los sujetos. Por lo tanto, los efectos de la vulnerabilidad son socialmente diferenciados: tanto los peligros meteorológicos relacionados con la variabilidad del clima como las causas humanas de la vulnerabilidad repercuten de modo diferente en los diversos grupos de la sociedad. Los estudios comparativos han

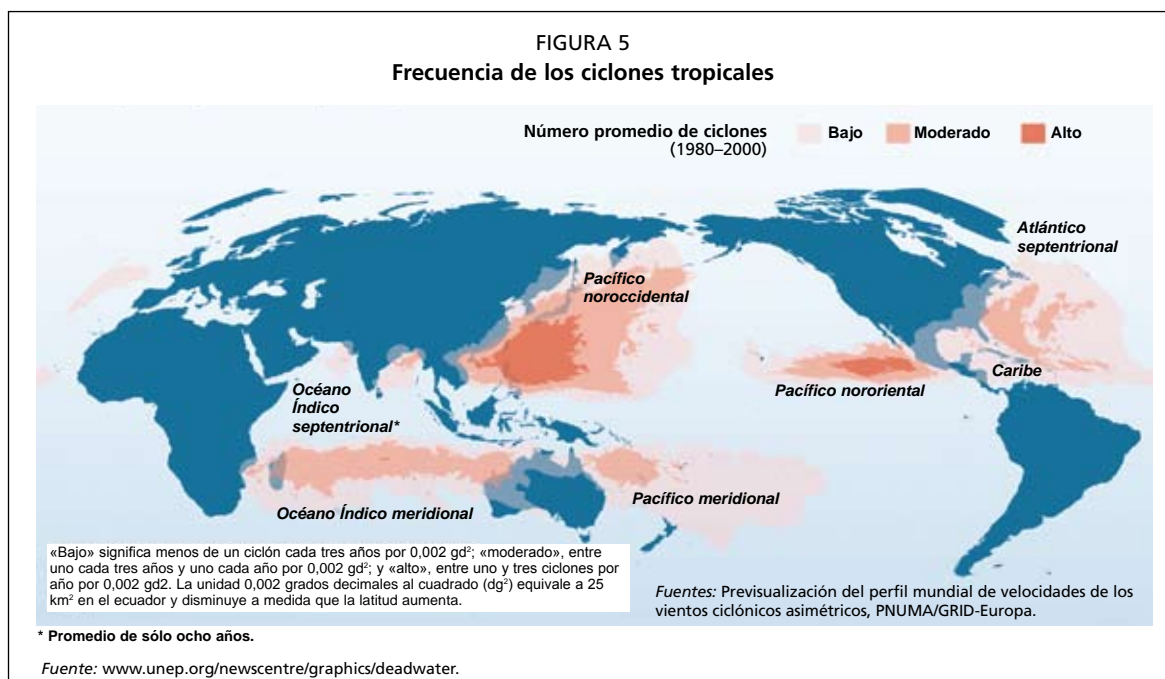
demostrado que, a lo largo de la historia, las personas pobres y marginadas han corrido los mayores riesgos de sufrir los efectos de los factores de peligrosidad natural, y que hoy los cambios climáticos intensificarán su vulnerabilidad (IPCC, 2007). Las familias pobres, por ejemplo, están obligadas a vivir en zonas de mayor riesgo en las cuales están más expuestas a las repercusiones de las inundaciones costeras; estos grupos están poco preparados para hacer frente a la reducción de los rendimientos de las pesquerías de subsistencia. Para las mujeres, los riesgos ante los peligros climáticos son específicos, porque sobre ellas recae el peso de las tareas de recuperación del hogar y de los medios de vida tras un acontecimiento catastrófico (Adger *et al.*, 2007).

El objetivo de evaluar la vulnerabilidad de las distintas zonas geográficas, países, agrupaciones sociales e individuos es identificar los sujetos que sufrirán los mayores daños y disponer de la información que pueda servir para orientar las políticas e intervenciones y secundar las medidas de adaptación.

4.6.1 Regiones geográficas caracterizadas por un alto índice de exposición potencial

El mayor aumento de las temperaturas del aire se ha registrado hasta la fecha en las zonas de altas latitudes, y es probable que con el cambio climático futuro esta tendencia continúe. Sin embargo, los pronósticos de cambios de la temperatura del agua, que son inducidos por las corrientes oceánicas, han sido menos exactos. Sólo algunos de los efectos climáticos en la pesca son inducidos por la temperatura (Figura 3), y por consiguiente los cambios proyectados en la temperatura del aire, que habitualmente forman parte de los pronósticos climatológicos, representan una medida imperfecta de la potencial exposición. Las regiones de baja latitud, por ejemplo aquellas en las cuales las pesquerías dependen de las surgencias, o las que contienen arrecifes de coral o los susceptibles flujos de agua dulce, pueden estar más expuestas a los efectos del cambio climático que las regiones de altas latitudes, que, según las predicciones, serán las que más se calentarán.

Las predicciones del IPCC (2007) indican que la intensidad de las tormentas tropicales irá en aumento, y que las tormentas afectarán específicamente a las comunidades e infraestructuras pesqueras en las zonas tropicales tormentosas (Figura 5). Aunque menos seguro, también es posible que el actual cinturón tormentoso tropical se expanda afectando a un mayor número de zonas. En ese caso, las más susceptibles serán inicialmente las comunidades por primera vez expuestas a las tormentas tropicales, si en esas regiones



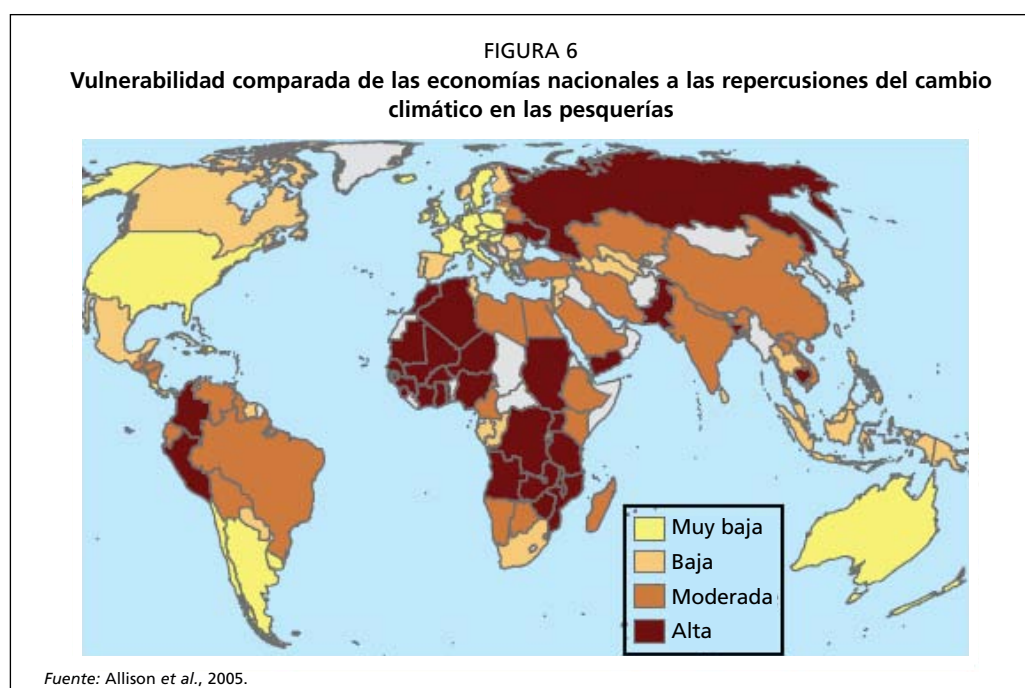
la infraestructura no están adecuadamente diseñada y si se carece de sistemas de alerta temprana o no se tiene experiencia previa de acontecimientos de este tipo.

Las comunidades pesqueras situadas en los deltas o en zonas de atolones coralíferos y en costas donde dominan las masas de hielos serán particularmente vulnerables al aumento del nivel del mar y a los riesgos de inundaciones, la invasión de las tierras por aguas salobres y a la erosión costera (Nicholls *et al.*, 2007a).

4.6.2 Economías vulnerables

Se suele dar por entendido que los países en desarrollo en regiones tropicales tienen una capacidad de adaptación menor que los países de nivel económico y de desarrollo humano alto. Esto se debe a la limitada disponibilidad de recursos en esos países y a la escasez de instituciones que faciliten los procesos de adaptación.

Un análisis realizado a nivel nacional de los índices de vulnerabilidad de 132 economías a las repercusiones climáticas en la pesca utilizó como parámetros estadísticos referidos al desarrollo y al PIB el cambio climático pronosticado, la sensibilidad de cada una de las economías a los trastornos de las actividades pesqueras y la capacidad de adaptación a los trastornos (Allison *et al.*, 2005). De acuerdo con los índices obtenidos, los países de África occidental y central (debido a sus bajos niveles de desarrollo y sus elevados índices de consumo de pescado), de América del Sur noroccidental (debido a sus muy cuantiosos desembarques) y cuatro países de Asia resultaron ser los más vulnerables (Figura 6)³. La Federación de Rusia y Ucrania fueron los países situados en altas latitudes en los que se registró un índice de vulnerabilidad alto, debido a que en esas zonas el calentamiento esperado podría alcanzar niveles elevados y porque el coeficiente de adaptación de dichos países es bajo.



³ Tomado de Allison *et al.* (2005): «A los efectos de la evaluación, la vulnerabilidad se consideró como función de la exposición al riesgo, de la susceptibilidad y de la capacidad de adaptación. La exposición al riesgo se evaluó en cuanto al cambio medio proyectado de la temperatura; y la susceptibilidad se basó en la importancia relativa de la pesca para la producción, el empleo, los ingresos de exportación y su contribución porcentual al PIB y al PIB agrícola, y su contribución a las proteínas de la dieta. Se supuso que la capacidad de adaptación estaba relacionada con el índice de desarrollo humano (IDH) y con los datos de rendimiento económico; es decir que los países con un IDH y un producto nacional bruto (PNB) más elevados tenían supuestamente una capacidad de adaptación mayor. Fue necesario recurrir a promedios nacionales y asumir que la distribución de la pobreza era similar a la distribución nacional promedia, porque los datos sobre pobreza de los pescadores no están ampliamente disponibles.»

En los países africanos, el análisis puso de relieve la relación entre baja capacidad de adaptación y elevación de los índices de vulnerabilidad, aunque según las predicciones el calentamiento ocurrirá mayormente en latitudes más altas. Si bien se trata de un análisis pionero en materia de vulnerabilidad de las pesquerías al cambio climático, es preciso apuntar algunas limitaciones. En primer lugar, se supuso que el aumento proyectado de la temperatura del aire sirve de indicador de exposición al cambio climático, mientras que los factores más importantes pueden ser los acontecimientos extremos o las repercusiones no inducidas por la temperatura. En segundo lugar, las limitaciones en cuanto a disponibilidad de datos impidieron que se incluyese en el estudio la mayor parte de los pequeños Estados insulares en desarrollo, los cuales, de acuerdo a lo esperado, son vulnerables por su gran dependencia de la pesca, su escasa capacidad de adaptación y su alto nivel de exposición a los acontecimientos extremos. Por último, para los análisis nacionales fue necesario hacer generalizaciones aproximativas y se pudo por lo tanto haber ignorado las zonas de conflicto en las que hay sectores o comunidades vulnerables.

Para mejorar la macro-cartografía de la vulnerabilidad y caracterizar más adecuadamente la exposición a los riesgos es necesario disponer de predicciones más detalladas acerca de la probabilidad de ocurrencia de acontecimientos extremos y de fenómenos hidrológicos y oceanográficos. Gracias a los proyectos que integran ciencias de la Tierra y ecología, tales como el Quest-Fish del Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural del Reino Unido, será posible avanzar en la caracterización de los aspectos de exposición y recurrir a parámetros más exactos que los cambios proyectados de la temperatura del aire (www.pml.ac.uk/quest-fish). Mientras tanto, la susceptibilidad y la capacidad de adaptación podrán ser cartografiadas con mayor detalle mediante datos subnacionales de más alta resolución sobre uso de recursos, consumo de pescado y comercio, producción pesquera y pobreza.

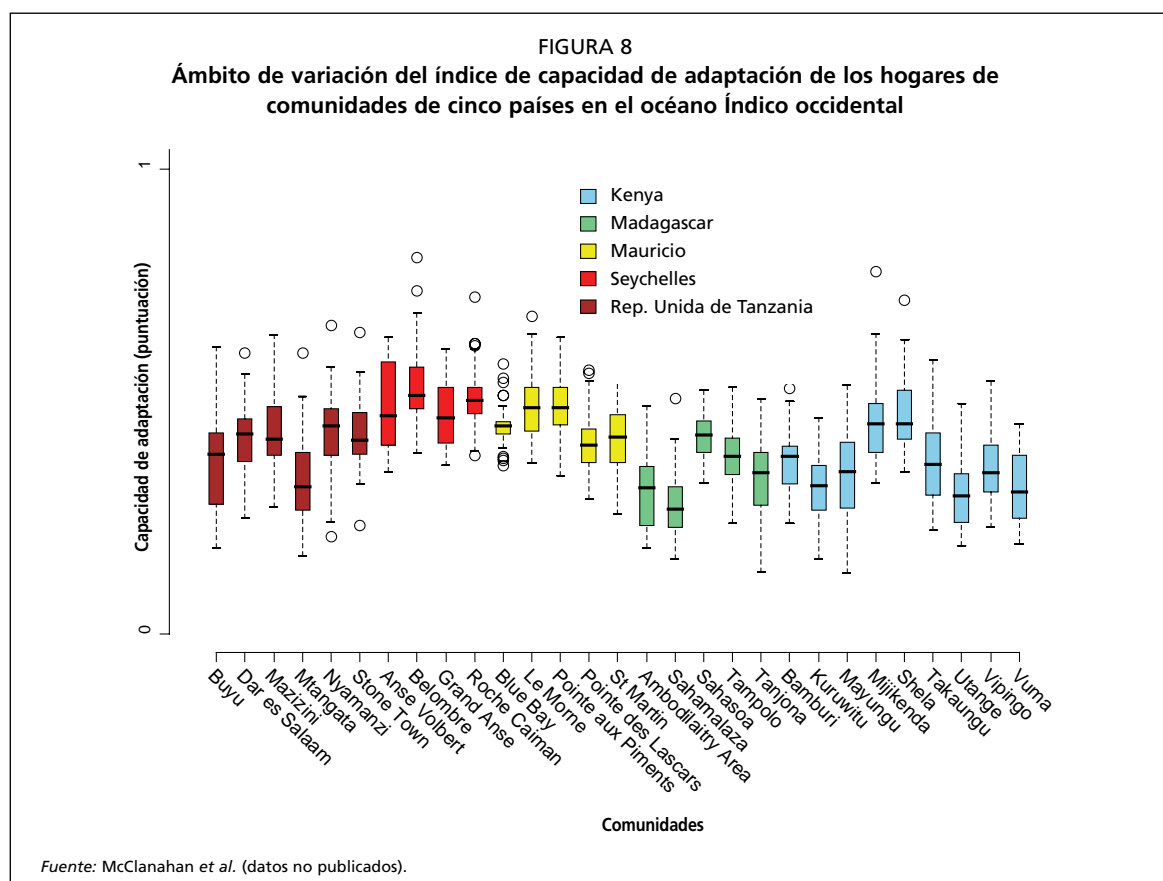
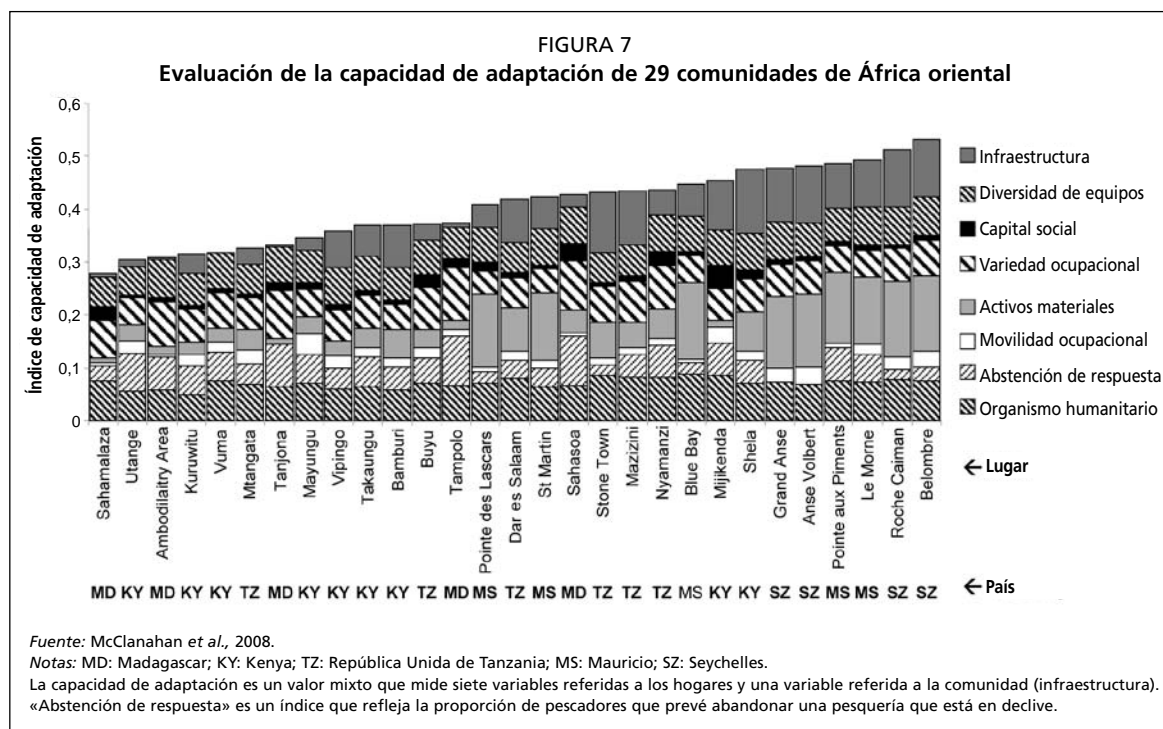
4.6.3 Vulnerabilidad de las comunidades

La vulnerabilidad también se puede analizar de acuerdo con las estadísticas subnacionales. Por ejemplo, McClanahan *et al.* (2008) dedujeron un índice de capacidad de adaptación respecto de la pérdida de medios de vida pesqueros de 29 comunidades costeras en cinco países del océano Índico occidental (Kenya, Madagascar, Mauricio, Seychelles y la República Unida de Tanzania). El índice combinaba ocho variables ponderadas, seleccionadas, a juicio de expertos de la región, por su importancia en la capacidad de adaptación. La clasificación resultante (Figura 7) hubiera podido predecirse a partir de las estadísticas nacionales de desarrollo, pero fue preciso tener en cuenta excepciones como algunas comunidades malgaches (con el nivel de desarrollo más bajo entre los cinco países) que alcanzaron una puntuación más alta que las comunidades de países ricos debido a su mayor movilidad ocupacional, porque declinaron responder al ser encuestadas o porque disponían de un «capital social» (p. ej. Sahaso). Así, los factores que indican la capacidad de adaptación son múltiples, y el índice de riqueza no representa un indicador completo.

4.6.4 Grupos vulnerables dentro de la sociedad (variaciones demográficas de la vulnerabilidad)

A escala más fina, la vulnerabilidad varía entre los individuos de una misma comunidad, siendo algunos grupos particularmente vulnerables. La Figura 8 se ha derivado de los mismos datos que la Figura 7 pero muestra el ámbito de adaptabilidad de los hogares en el seno de cada comunidad y país. Se observan tantas variaciones de capacidad de adaptación entre los hogares como entre las comunidades y países, y esto ejemplifica cómo la adaptabilidad fluctúa a nivel nacional, de la comunidad o del hogar.

Se supone a menudo que la vulnerabilidad se correlaciona en general con la pobreza. El huracán *Katrina*, que azotó la ciudad de Nueva Orleans en agosto de 2005,



demonstró la particular vulnerabilidad de la población pobre, incluso en los países más prósperos. Las familias pobres, incluyendo una gran proporción de afro-americanos, se mostraron poco dispuestas a abandonar la región antes de la llegada del huracán, y ello hizo aumentar el número de muertes y las posteriores repercusiones en la viviendas, la educación y la situación psicológica de la población (Save the Children,

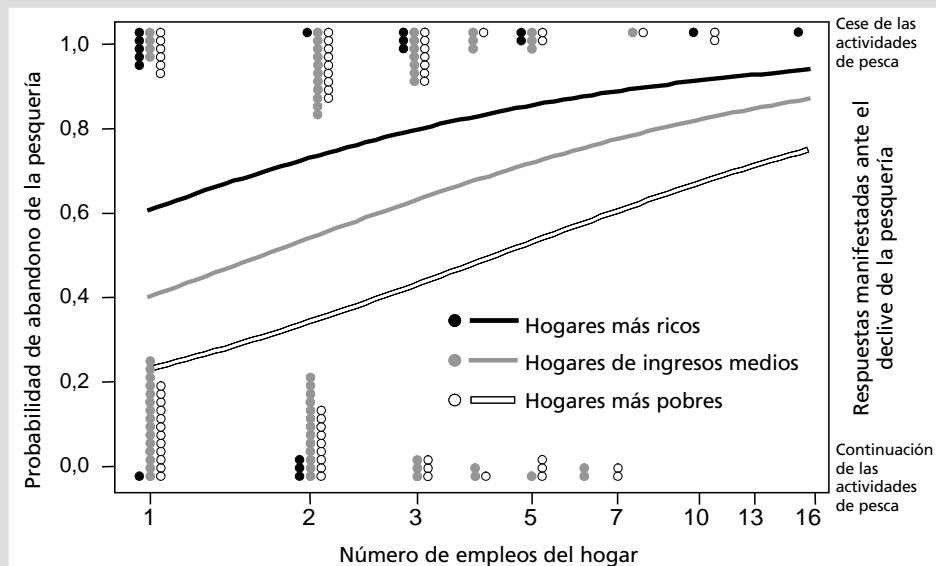
2007). Los miembros más pobres de la comunidad son también aquellos que con mayor probabilidad carecen de protección de un seguro o de acceso a la información de alerta temprana.

Además de su vulnerabilidad frente a los desastres, se supone por lo general que los miembros más pobres de la sociedad son aquellos cuya capacidad de adaptación para enfrentar los cambios graduales o a la mengua de los medios de subsistencia es más reducida. Por ejemplo, los pescadores kenianos pertenecientes a hogares pobres eran los que con mayor probabilidad terminaban atrapados en una pesquería en declive (Recuadro 8).

Algunos factores distintos de la pobreza también pueden influir en la vulnerabilidad. Por ejemplo, las mujeres son más vulnerables a los peligros naturales y a las repercusiones del cambio climático porque es más probable que en caso de sucesos perturbadores se encuentren en el hogar y sobre ellas recaigan las tareas pesadas y prodigar cuidados tras las situaciones de emergencia. Se da por supuesto también que en muchas sociedades el nivel de adaptabilidad de las mujeres es menor que el de los hombres. Por ejemplo, las

RECUADRO 8
Capacidad de adaptación de los pescadores kenianos y condiciones socioeconómicas de los hogares

Un estudio sobre el grado de preparación de los pescadores kenianos para abandonar las actividades pesqueras ante la disminución de las capturas determinó que existía una relación significativa entre los sujetos que afirmaron que cesarían de pescar si las capturas descendían un 50 por ciento y las variables socioeconómicas que determinaban la situación del hogar. Los pescadores que pertenecían a los hogares más acomodados (a juzgar por su nivel de vida material, los materiales con los que estaban construidas sus viviendas y la posesión de electrodomésticos) eran quienes mayormente manifestaban su disposición a abandonar la pesquería. A nivel del hogar, las oportunidades relacionadas con los medios de vida también eran un indicador significativo; la probabilidad de abandono estaba en relación significativa con el número total de empleos del hogar.



Relación estadística entre riqueza, empleos del hogar y número de pescadores que afirmaban que abandonarían la pesquería si las capturas disminuían en un 50 por ciento. Los puntos muestran los datos reales; las líneas muestran las relaciones arrojadas por una regresión logística binomial.

Fuente: Cinner et al. (2009).

opciones económicas de las mujeres son más restringidas, su nivel de educación formal más corto, y su goce de derechos y de acceso a los recursos más limitado. Los hogares encabezados por mujeres, que en muchas sociedades tienden a ser los más pobres, se consideran especialmente vulnerables.

La importancia de los factores contextuales queda adecuadamente ilustrada por los estudios de impacto del tsunami del océano Índico de 2004 (Oxfam International, 2005). En todas las regiones costeras afectadas, el mayor número de muertos correspondió a mujeres; y en algunas comunidades hubo dos a tres veces más muertes de mujeres que de hombres. Varios factores explican la mayor mortalidad registrada entre las primeras; algunos de ellos son de naturaleza señaladamente local y están ligados específicamente al contexto, por ejemplo la capacidad de nadar, la fortaleza física y la necesidad de proteger y cuidar a los niños y a los ancianos. En algunas localidades, las mujeres que se encargan de elaborar y vender el pescado esperaban en tierra el regreso de los botes de pesca a la hora en que se produjo el tsunami. Esto expuso a las mujeres a sufrir niveles de mortalidad más elevados que los hombres que estaban en la mar. Estas muertes diferenciadas han tenido por cierto implicaciones significativas relacionadas con los programas de socorro y rehabilitación y con los efectos a largo plazo en las familias y comunidades. Sin embargo, sobre esta materia existen pocos estudios empíricos rigurosos (véase Vincent, 2006), y por lo tanto en la literatura abundan los conceptos generalizadores y las suposiciones no probadas. En muchas situaciones, por ejemplo, las mujeres pueden acceder de variadas formas a un abundante capital social que representa un apoyo a la hora de deber superar impactos causados por acontecimientos extremos.

4.6.5 Vacíos cognoscitivos en materia de vulnerabilidad

La capacidad de identificar a los sujetos vulnerables a los efectos del cambio climático se ve limitada por la carencia de datos de gran resolución y en escalas apropiadas y por la incertidumbre de los procesos que determinan la vulnerabilidad de las personas y los lugares. La Cuarta evaluación del IPCC puso de manifiesto que, en cuanto a impactos y adaptación, los conocimientos, el seguimiento y la modelización de los impactos observados y futuros están sesgados a favor de los países desarrollados (IPCC, 2007).

El cambio de la escasez o impredecibilidad de recursos debido al cambio climático producirá ciertamente determinados efectos en aquellos individuos cuyos medios de vida dependen en su totalidad y directamente de la pesca. Pero no está claro si esta dependencia de la pesca respaldará el esfuerzo de alcanzar una gestión sostenible (como se observa en algunas circunstancias y se explica por la teoría de la gestión de bienes comunes); si producirá una mayor sobreexplotación si la disponibilidad futura de recursos se vuelve más incierta; o si favorecerá la diversificación de los medios de vida que hasta ahora se basaban en la pesca, con las consiguientes notables consecuencias sociales e incluso medioambientales. Es posible que los tres casos genéricos mencionados ocurran. Por tanto, es importante investigar cuáles son, en las regiones de riesgo, los objetivos de adaptación que pueden ser considerados deseables y sostenibles para las partes interesadas.

No se ha conseguido entender cómo las estrategias de adaptación en general puestas en práctica en zonas costeras afectadas en múltiples formas por el cambio climático pueden repercutir en otras estrategias y en zonas costeras vecinas. Se ha mostrado por ejemplo que las medidas de mitigación de inundaciones adoptadas en Bangladesh para proteger los terrenos agrícolas pueden ser perjudiciales para las pesquerías (p. ej. Shankar, Halls y Barr, 2004). Análogamente, las grandes obras de ingeniería destinadas al resguardo de costas pueden producir alteraciones en la carga sólida y en la dinámica costera en zonas o países vecinos. Y la «deambulación» de las flotas pesqueras comerciales en su afán de seguir las migraciones de las poblaciones de peces puede repercutir en países vecinos e incluso en países distantes.

Por último, en los sistemas ecológicos y físicos de los océanos y áreas costeras pueden existir umbrales cruciales que influyen directamente en la vulnerabilidad de esas regiones; en especial los umbrales de colapso de poblaciones, la acidificación de los océanos y sus consecuencias en los organismos calcificantes y en el aumento de las temperaturas que más allá de ciertos valores determinan la decoloración masiva de los corales. Los riesgos de grandes alteraciones en el equilibrio ecológico aumentan la exposición y vulnerabilidad de las comunidades dependientes, pero pueden no ser conocidos hasta después de que se ha atravesado el umbral.

5. ADAPTACIÓN DE LAS PESQUERÍAS AL CAMBIO CLIMÁTICO

La adaptación al cambio climático se define en la literatura como el proceso de ajuste de los sistemas ecológicos, sociales o económicos en respuesta a los cambios observados o esperados de que son objeto los estímulos de orden climático y en sus repercusiones, con la finalidad de aliviar los impactos adversos del cambio o sacar provecho de las nuevas oportunidades. Dicho en otras palabras, la adaptación es el conjunto de estrategias y acciones realizadas por los individuos como reacción al cambio o en anticipación a sus efectos con el propósito de mejorar o de mantener su bienestar.

Las acciones de adaptación pueden por consiguiente consistir tanto en las capacidades para incrementar las habilidades que permiten a individuos, grupos u organizaciones predecir los cambios y adaptarse a sus efectos como en la puesta en ejecución de las decisiones de adaptación transformando esas capacidades en acciones. Ambas dimensiones de la adaptación son útiles para prepararse o para responder a las repercusiones del cambio climático. Así, la adaptación es un flujo continuo de actividades, acciones, decisiones y actitudes que conforman las decisiones relativas a todos los aspectos de la vida y que reflejan las normas y procesos sociales en vigor. Smit *et al.* (2000) clasifican las opciones de adaptación según sus distintos propósitos, modos de ejecución o configuración institucional.

Coulthard (2009) pone de relieve la diferencia entre acciones de adaptación a las fluctuaciones de los recursos –que implican la diversificación de medios de vida con el objeto de mantener una subsistencia basada en la pesca– y los métodos de adaptación que surgen cuando los pescadores deciden «colgar las redes», abandonar la pesquería y optar por otros medios de vida. Una segunda respuesta, que suele observarse cuando los rendimientos escasean, es la intensificación de la pesquería mediante el aumento de las inversiones. Se puede entonces aumentar el esfuerzo (pasando más tiempo en la mar), acrecentar la capacidad (aumentando el número, tamaño o eficiencia de los aparejos o la tecnología pesquera) o pescar a mayor distancia o profundidad. Es obvio que estas respuestas de adaptación pueden producir consecuencias negativas a largo plazo si la sobreexplotación ya es un problema para la pesquería. El estado de muchas de las pesquerías del mundo ofrece pocas oportunidades de intensificación sostenible como estrategia de adaptación.

Es inevitable que las estrategias de adaptación sean específicas de un lugar o un contexto. En efecto, Morton (2007) argumenta que en el caso de los pequeños productores o los sistemas agrícolas de subsistencia, tanto los impactos del cambio climático como las acciones de adaptación a sus efectos serán difíciles de modelizar y por tanto de predecir. Esto se debe a factores como la integración de las estrategias relativas a los medios de vida agrícolas y no agrícolas y a la exposición a diversos factores de estrés, que van desde los que se vinculan con fenómenos naturales a aquellos que resultan de cambios normativos. Es probable que análogas condiciones predominen en el sector de la pesca de subsistencia, aunque esto no ha sido investigado respecto a sistemas agrícolas marginales y de subsistencia. Ante la complejidad de esta cuestión, se han propuesto varias tipologías que describen los mecanismos de adaptación de los medios de subsistencia.

Las respuestas de adaptación se pueden organizar conceptualmente de acuerdo con criterios cronológicos y de responsabilidad (véase el Tabla 6). Los modos de adaptación

específica de la pesca industrial serán diferentes de los de la pesca en pequeña escala. Por ejemplo, Thornton *et al.* (2007) indican que la intensificación, la diversificación y el aumento de las actividades fuera de la granja son las modalidades de adaptación más comunes en los ambientes pastorales, mientras que Eriksen *et al.* (2005) añaden, dentro de los sistemas de cultivo, el uso de una biodiversidad ampliada y el aprovechamiento de alimentos silvestres. En el campo de la pesca se constatan respuestas análogas en las actuaciones de intensificación, de diversificación de especies buscadas o de abandono de la pesquería a favor de otros medios de vida. Agrawal y Perrin (2007) han examinado las estrategias relacionadas con los recursos de subsistencia e indican que en todos los casos los riesgos se comparten mediante procedimientos de movilidad, almacenamiento, diversificación, puesta en común de los activos e intercambio. Si bien la mayor parte de las pesquerías (incluso las en pequeña escala) no son de subsistencia (Berkes *et al.*, 2001), esta tipología puede servir para conceptualizar las acciones de adaptación de las pesquerías en pequeña escala al cambio climático.

5.1 Ejemplos de actuaciones de adaptación en el sector pesquero

En todo el mundo, los pescadores y sus comunidades ya se están adaptando a varias formas de cambio (Coulthard, 2009). Por lo tanto, es mucho lo que se puede aprender examinando cómo los pescadores se han adaptado a los fenómenos de variabilidad climática como El Niño y a presiones y conmociones no climáticas como la pérdida de mercados o las nuevas regulaciones. El Recuadro 6 enumera algunas posibles actuaciones de adaptación a los impactos identificados en el Recuadro 5. En los ejemplos de adaptación en el sector pesquero dominan la diversificación y la flexibilidad de los medios de vida (véase Allison, Beveridge y van Brakel, 2008) y la migración (Recuadro 9) en respuesta a las fluctuaciones en los rendimientos debidas a las alteraciones del clima.

Se cree que las respuestas anticipadas a las repercusiones directas causadas por sucesos extremos en las infraestructuras pesqueras y las comunidades son más eficaces si forman parte de un plan de gestión de riesgos costeros integrado de largo plazo (Nicholls, 2007a). Las actuaciones de adaptación a la subida del nivel del mar y a los daños causados por la intensificación de las tormentas y marejadas ciclónicas incluyen la construcción de estructuras de protección rígidas (p. ej., diques marítimos en talud) y blandas (p. ej., la rehabilitación de humedales o los dispositivos de gestión de retirada de aguas) y sistemas de información mejorados que integran conocimientos provenientes de diferentes sectores costeros con que se planifican estrategias apropiadas.

Las repercusiones socioeconómicas indirectas son probablemente más arduas de predecir, y resulta difícil describir medidas de adaptación específicas. Las pesquerías estarían menos expuestas a sufrir impactos si los productos y mercados estuviesen diversificados; sin embargo, las tecnologías de la información están ahora al alcance de los pescadores de pequeña escala y les pueden ayudar a conocer mejor los mercados internacionales y a obtener precios justos para sus productos (FAO, 2007b). En términos generales, se estima que al reducirse la marginación y vulnerabilidad de los pescadores se crean medidas de adaptación anticipada a varios tipos de amenazas y se facilita la ordenación sostenible (FAO, 2007c).

Los aspectos culturales y socioeconómicos limitan la capacidad de adaptación de los individuos de modo aparentemente no previsible. En la zona del lago Pulicat en la India, por ejemplo, el acceso a las pesquerías de peces y camarones está condicionado por la pertenencia de los pescadores a las distintas castas. Los miembros de la casta que no practica la pesca carecen de derechos hereditarios tradicionales de acceso, y por este motivo son más pobres y están marginados. Sin embargo, cuando se registró la disminución de las capturas, estos pescadores adventicios se mostraron más capaces de adaptarse a los trabajos fuera del sector pesquero y fueron mucho menos vulnerables a los efectos de la variabilidad anual de las poblaciones de peces (Coulthard, 2006).

TABLA 6

Adaptaciones específicas a los impactos del clima en las pesquerías

Repercusión en las pesquerías	Posibles medidas de adaptación	Responsabilidad	Escala temporal
Reducción de la productividad y rendimiento de la pesquería (efecto ecológico indirecto)	Acceso a mercados de valor más alto	Publica/privada	Cualquiera de las dos
	Aumento del esfuerzo o de la capacidad pesquera*	Privada	Cualquiera de las dos
Aumento de la variabilidad de los rendimientos (efecto ecológico indirecto)	Diversificación de la cartera de medios de vida	Privada	Cualquiera de las dos
	Planes de seguro	Publica	Anticipada
	Ordenación precautoria de ecosistemas resilientes	Publica	Anticipada
	Ejecución de medidas de ordenación integradas y adaptativas	Publica	Anticipada
Cambio en la distribución de las pesquerías (efecto ecológico indirecto)	Investigación y desarrollo privados, e inversión en tecnologías para predecir rutas de migración y disponibilidad de las poblaciones comerciales*	Privada	Anticipada
	Migración*	Privada	Cualquiera de las dos
Rentabilidad reducida (efecto ecológico y socioeconómico indirecto)	Reducción de los costos para aumentar la eficiencia	Privada	Cualquiera de las dos
	Diversificación de los medios de vida	Privada	Cualquiera de las dos
	Abandono de la pesquería a favor de otros medios de vida/ otras inversiones	Privada	De reacción
Aumento de la vulnerabilidad de las comunidades e infraestructuras costeras, ribereñas y de llanos a las inundaciones, a la subida del nivel del mar y a las marejadas ciclónicas (efecto directo)	Estructuras de protección rígidas*	Publica	Anticipada
	Retirada/acomodación gestionadas	Publica	Anticipada
	Rehabilitación y respuesta ante los desastres	Publica	De reacción
	Ordenación integrada de costas	Publica	Anticipada
	Provisión de infraestructuras (p. ej., protección de puertos y desembarcaderos)	Publica	Anticipada
	Sistemas de alerta temprana y educación	Publica	Anticipada
	Recuperación tras los desastres	Publica	De reacción
	Migración asistida	Publica	De reacción
Aumento de los riesgos asociados con la pesca (efecto directo)	Seguro privado de los equipos de capital	Privada	Anticipada
	Ajustes en los mercados de seguros	Private	De reacción
	Suscripción de pólizas de seguro	Publica	De reacción
	Sistema de alerta meteorológica	Publica	Anticipada
	Inversiones en la mejora de la estabilidad y seguridad de las embarcaciones	Privada	Anticipada
	Compensación los impactos sufridos	Publica	De reacción
Perturbación de los intercambios comerciales y el mercado (efecto socioeconómico indirecto)	Diversificación de los mercados y productos	Privada/publica	Cualquiera de las dos
	Servicios de información para anticipar las perturbaciones en los precios y mercados	Publica	Anticipada
Desplazamientos de población y afluencia consiguiente de nuevos pescadores (efecto socioeconómico indirecto)	Apoyo de las instituciones de ordenación local existentes	Publica	Cualquiera de las dos
Varios	Investigación y desarrollo puestos a disposición por el sector público	Publica	Anticipada

Fuentes: Categorías adaptadas de Tompkins y Adger (2004) y Smit et al. (2000).

Note: *Actuaciones de adaptación a los rendimientos en declive/variables que pueden extremar directamente la sobreexplotación de las pesquerías debido a que aumentan la presión pesquera o porque perjudican los hábitats.

RECUADRO 9

Formas de adaptación de los individuos e instituciones oficiales a la variabilidad climática en las pesquerías de la vieira de Perú

La pesquería de la vieira peruana (*Argopecten purpuratus*) ha registrado fuertes oscilaciones causadas por las variaciones entre los regímenes climáticos de El Niño y La Niña, que son fenómenos responsables de la modificación de la extensión de las zonas de surgencia y de la alteración de las temperaturas del mar frente a las costas de Perú. Los pescadores reaccionan a estas fluctuaciones adaptándose de modo informal, con rapidez y flexibilidad y migrando entre los lugares que experimentan fluctuaciones opuestas en cuanto a rendimientos, resultantes del fenómeno de El Niño. Por el contrario, las instituciones de ordenación pertenecientes al sector estructurado han tardado en responder a las fluctuaciones y han mostrado escasa capacidad para aprender de experiencias pasadas. No obstante, estas instituciones son necesarias porque tienen en cuenta los factores a escalas mayores y los factores que se manifiestan durante largo tiempo, y porque dictan medidas que previenen los fallos de adaptación como el esfuerzo pesquero a niveles insostenibles.

Fuente: Badjeck, 2008; Badjeck *et al.* (2009).

5.1.1 La adaptación en el ámbito de la ordenación pesquera

La ordenación pesquera aún se lleva a cabo de forma acrítica partiendo del supuesto de que es necesario extraer el máximo rendimiento sostenible del potencial productivo de una población. Por ejemplo, en las pesquerías de peces de fondo del mar del Norte se han implantado recientemente medidas de ordenación que persiguen restituir la biomasa objetivo del bacalao a un volumen de 150 000 toneladas. Aunque las influencias climáticas en la productividad del bacalao han sido reconocidas (Anónimo, 2007), no se dispone en la actualidad de una estrategia oficial que permita incorporar los procesos medioambientales en los objetivos y medidas de ordenación. Conforme el cambio climático acentúa las variaciones medioambientales, los gestores pesqueros deberán tomar en consideración la existencia de estas oscilaciones y dejar de lado los parámetros estáticos al llevar a cabo la ordenación de una población determinada. Estos cambios implican, una vez más, que es imperativo aplicar un enfoque ecosistémico de la pesca (EEP), que es una aproximación holística, integrada y participativa que busca conseguir la sostenibilidad del sector (FAO, 2006).

5.1.2 Función de las instituciones en las actuaciones de adaptación

Entiéndese por instituciones, en sentido amplio, las tradiciones formales e informales, las reglas, los sistemas de gobernanza, las costumbres, las normas y las culturas. La importancia de las instituciones (especialmente las informales) puede ser subestimada cuando, con el propósito de facilitar o de limitar las actuaciones de adaptación, se adopta un enfoque técnico. Por ejemplo, como medida de adaptación a la disminución de los rendimientos pesqueros se podría recurrir a las prácticas tradicionales o establecer nexos con formas alternativas de subsistencia; en cambio, la identidad cultural relacionada con la pesca puede obstaculizar los esfuerzos de adaptación e imposibilitar el proyecto de abandono de la pesquería si los pescadores lo consideran (Coulthard, 2009).

Una amplia literatura documenta ejemplos de instituciones de ordenación que facilitan el manejo de los recursos locales de propiedad común, y se estima que tales instituciones permiten una ordenación adaptativa y sostenible (véase por ejemplo Berkes, Colding y Folke, 2000; Ostrom, 1990). No obstante, ante la intensificación de las repercusiones del cambio climático, éstas pueden también entorpecer la flexibilidad necesaria para una ordenación sostenible (Coulthard, 2009). Las instituciones oficiales

también pueden restringir el alcance de las actuaciones de adaptación; por ejemplo, en Perú las instituciones creadas para garantizar los derechos de acceso y mejorar la ordenación de las poblaciones de vieira podrían impedir las futuras repuestas de migración ante las perturbaciones ocasionadas por el fenómeno de El Niño (Recuadro 9); mientras que en las pesquerías de Terranova el aumento de las regulaciones sobre el uso de los aparejos y en materia de sectores pesqueros tuvo como resultado que cuando se produjo el colapso de las poblaciones de bacalao los pescadores que antes explotaban varias especies se vieron «encerrados» en la pesquería que se había derrumbado y no pudieron aprovechar las pesquerías de mariscos en expansión creciente (Hilborn *et al.*, 2003).

5.2 Creación de capacidad de adaptación en las pesquerías

5.2.1 Factores de incertidumbre y de sorpresa, y la necesidad de construir una capacidad de adaptación general

Existe gran incertidumbre respecto a la naturaleza y la dirección de las alteraciones y conmociones que el cambio climático produce en la pesca. Las inversiones financieras en la capacidad genérica de adaptación y en sistemas pesqueros dotados de resiliencia parecen ser una buena estrategia que permitiría dar apoyo a formas nuevas de adaptación que en la actualidad no es posible de prever. Las pesquerías mejor ordenadas, reglamentadas por instituciones flexibles y justas, serán las que probablemente tengan la mayor capacidad de adaptación. Por ejemplo, la adopción del EEP podría redundar en un gran beneficio en cuanto a actuaciones anticipadas para afrontar los efectos del cambio climático.

Muchos pescadores son vulnerables a un conjunto de factores de perturbación que, sumados, cercenan su capacidad de adaptación a los impactos del cambio climático (FAO, 2007c, d). Así por ejemplo, las medidas para enfrentar la marginación de las comunidades pesqueras y a su vulnerabilidad al VIH/SIDA y a otras enfermedades, y a la inseguridad en materia de recursos, representan también una forma de adaptación anticipada a las conmociones que produce el cambio climático.

5.2.2 Revisión de los postulados iniciales (¿Hemos estado aquí antes?)

La capacidad genérica de adaptación se incrementa a través del buen manejo de poblaciones sostenibles, mejorar el bienestar y reducir la vulnerabilidad de los pescadores. Por lo tanto, la progresiva consolidación de pesquerías caracterizadas por prácticas equitativas y sostenibles –metas de la ordenación pesquera– puede ser vista como una forma de progreso comunitario en cuanto a creación de capacidad de adaptación. Se ha reconocido desde antiguo que al ordenar hay que tener en cuenta los inherentes factores de incertidumbre que resultan de la variabilidad climática, de las fluctuaciones del reclutamiento íctico y de nexos desconocidos entre los aspectos ecológicos y sociales de las pesquerías (p. ej. Charles, 1998).

Por consiguiente, tomando en cuenta los factores de incertidumbre, las actuaciones de adaptación a los cambios climáticos –que se plasman en la creación de capacidad de recuperación de las poblaciones ícticas y de las comunidades pesqueras– podrían ser vistas como un modo de poner en ejecución las buenas pautas de gobernanza, tal y como se ha recomendado a lo largo de la última década. Independientemente del cambio climático, se plantea la pregunta de si se requieren efectivamente nuevas intervenciones para secundar las medidas de adaptación.

Si bien las amenazas son conocidas, se necesitarán probablemente más recursos y esfuerzos para adaptar las pesquerías a los efectos del cambio climático. La mayor parte de las pesquerías aún no han sido objeto de planes de ordenación sostenible y equitativa en los que se tomen en cuenta los factores de incertidumbre.

Pueden suscitarse en los sistemas cambios repentinos causados por las alteraciones climáticas, que presentan nuevos desafíos; y la magnitud de los cambios puede,

simplemente, rebasar las opciones de «buena gobernanza pesquera» existentes. Es posible que sea menester poner en práctica actuaciones específicas de adaptación para los pescadores y comunidades más pobres, marginadas y vulnerables, y que dichas actuaciones vayan más allá de las formas de asistencia al desarrollo usadas previamente. Al amparo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) existen hoy mecanismos internacionales de financiación que se están desarrollando para respaldar las actuaciones de adaptación. Con éstas se han financiado por ejemplo los programas de acción nacionales para la adaptación en los países pobres. Se están destinando por consiguiente fondos considerables a los programas de adaptación específica, pero se estima que no son suficientes para solventar los costos enormes involucrados; además, los problemas relacionados con la definición del ámbito de las intervenciones de adaptación al cambio climático y su financiación –que son distintas de las que persiguen crear capacidad de adaptación general– complican el proceso de asignación de fondos (Ayers y Huq, 2009).

6. CONCLUSIÓN

Se predice que el cambio climático tendrá múltiples repercusiones en las pesquerías y en las personas que dependen de ellas. Tal como sucede habitualmente en el dominio de la ciencia sobre los cambios climáticos, existe un abundante cuerpo de conocimientos acerca de los efectos biofísicos de estos últimos en los ecosistemas acuáticos, pero un escaso volumen de información sobre la forma en que esos efectos podrán transmitirse en función del contexto socioeconómico de la pesca y de la configuración de las actuaciones de adaptación.

Se desprende del examen de los conocimientos obtenidos en áreas semejantes a las del cambio climático realizado por los autores de este estudio que las repercusiones que derivarán de las modificaciones que sufrirá el contexto humano en el cual se desarrollan las pesquerías (suministro, demanda, tecnología y capacidad de ordenación de recursos de propiedad colectiva) serán al menos tan importantes como las secuelas ecológicas o los impactos directos del cambio climático que conocerán los medios de vida de las comunidades pesqueras vulnerables en el futuro cercano.

La vulnerabilidad de las pesquerías al cambio climático no es sólo determinada por la intensidad del cambio o sus repercusiones, sino también por el grado de susceptibilidad de los individuos y los sistemas pesqueros y por su capacidad de adaptación. Esta última depende de diversos activos y puede verse limitada por factores como la cultura o la marginación. Se ha revisado aquí qué contribución aporta el marco de medios de vida sostenibles a la descripción y medición objetiva del contexto pesquero, y la importancia de éste para la comprensión del papel desempeñado por las pesquerías en los medios de vida.

La responsabilidad primordial de los gobiernos, la sociedad civil y las organizaciones internacionales respecto al cambio climático es actuar con decisión para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las consecuencias a largo plazo del cambio climático son sumamente complejas, desconocidas y potencialmente irreversibles, y muchos grupos que ya están marginados son especialmente vulnerables a sus repercusiones. A causa del consumo de combustibles fósiles en la captura y transporte, la pesca contribuye moderadamente a las emisiones de gases de efecto invernadero; pero éstas se pueden reducir si se mejoran la tecnología y el manejo de las poblaciones. Las emisiones que ya se han producido en el mundo significan que el cambio climático afectará efectivamente a los sistemas marinos y de aguas continentales y a las comunidades pesqueras. Por lo tanto, compete a los gobiernos facilitar las medidas de adaptación, especialmente para los grupos vulnerables debido a su exposición, sensibilidad o falta de capacidad de adaptación. Se impone por ende que la investigación:

- identifique cuáles son los individuos y comunidades más vulnerables;
- averigüe las posibles medidas de adaptación facilitadas por el gobierno;

- tome en cuenta las limitaciones que afectan a las actuaciones de adaptación en el sector privado;
- busque métodos de adaptación deseables que contribuyan a reducir la vulnerabilidad de forma durable, en lugar de instaurar estrategias paliativas de corto plazo que pueden aumentar la vulnerabilidad.

El examen de los impactos potenciales del cambio climático en las pesquerías sugiere el papel de la política pública en materia de adaptación: reducir la vulnerabilidad y suministrar información para las iniciativas de planificación y estímulo de actuaciones de adaptación, asegurando que dichas actuaciones no perjudiquen a otros servicios del ecosistema o la viabilidad de las pesquerías a largo plazo.

La primera razón para promover las actuaciones de adaptación es brindar protección a aquellos segmentos del sector pesquero y de las comunidades costeras que menos son capaces de afrontar las nuevas situaciones. Las regiones costeras afectadas por el cambio climático están por ejemplo sometidas a diversos factores de estrés relacionados con la globalización de las pesquerías; y, en el caso de los países en desarrollo, por la carencia de infraestructuras públicas, el alto índice de enfermedades y por muchos otros factores que limitan la capacidad de adaptación.

La segunda respuesta de las políticas públicas consiste en proveer información de alta calidad sobre los riesgos, la vulnerabilidad y las amenazas que derivan del cambio climático. Tal información comprende la elaboración de hipótesis globales de cambios, pero supone también inversiones cuantiosas para incorporar la información sobre el clima en la planificación del uso de la tierra en zonas costeras y otras formas de regulación. Es por consiguiente necesario proceder a una integración de las políticas a través de los distintos sectores de gobierno, comprendido el sector de la planificación costera, la ordenación de cuencas hidrográficas, la agricultura, la pesca misma y la salud y nutrición, ya que en ellos los riesgos del cambio climático actúan recíprocamente.

El tercer campo de respuesta en materia de políticas es el suministro y la mejora de los bienes y servicios públicos pesqueros y servicios afines relacionados con la biodiversidad y el ecosistema. La Evaluación de ecosistemas del Milenio puso de relieve la importancia de los servicios ecosistémicos para el bienestar humano. Dada la posibilidad de declinación de los hábitats y extinción de las especies en todo el mundo, las repercusiones del cambio climático representan razones añadidas para promover la conservación de la biodiversidad en las regiones costeras.

Es imperativo mejorar la gobernanza pesquera tomando en cuenta los factores de variabilidad natural, de incertidumbre y de sostenibilidad para hacer frente a la sobrecapacidad y a la sobrepesca, evitar las pérdidas económicas, los peligros que las pesquerías puedan correr en el futuro y la degradación de los sistemas acuáticos (el enfoque ecosistémico de la pesca se plantea, pues, como una medida urgente).

Además, para hacer frente a la marginación de los pescadores y atender las cuestiones relacionadas con la equidad, las organizaciones internacionales fomentan actualmente una gobernanza en pro de los pobres y orientada a las pesquerías en pequeña escala (FAO, 2005a). Los desafíos bien conocidos relacionados con la gobernanza continuarán y se harán quizá más apremiantes con el cambio climático. Los factores de variabilidad y de incertidumbre, que tradicionalmente han sido conceptos importantes y que los gestores se han esforzado por tomar en cuenta, se convertirán en asuntos preponderantes a la luz del cambio climático. Mientras tanto, la pobreza de las pesquerías en pequeña escala y la marginación de los pescadores reducen su capacidad de adaptación.

El contexto más amplio de las pesquerías es también importante debido a que las políticas, los factores socioeconómicos, demográficos y ecológicos y los mercados pueden ejercer variadas influencias en las pesquerías (y constituir vías importantes a través de las cuales se harán sentir las repercusiones del cambio climático), pero también porque dichos factores conocen una rápida evolución resultante de la globalización.

En el futuro, los cambios climáticos no incidirán en las pesquerías del modo en que

lo harían hoy porque las alteraciones climáticas futuras afectarán a la pesca dentro del contexto que le será propio en el porvenir. Esto aumenta la incertidumbre y acentúa la necesidad de diseñar una gobernanza adaptativa e integrar la pesca con otros sectores conexos, en particular la agricultura, que puede por sí misma afectar a las pesquerías a causa de las repercusiones que en el sector ejerce el clima y de las actuaciones de adaptación que se ponen en práctica ante sus efectos.

Los problemas actuales de la ordenación pesquera hacen necesarias instituciones fuertes y fiables para el manejo de los recursos; pero paradójicamente los enfoques rígidos de tipo descendente, que podrían parecer atractivos, no ofrecerán la flexibilidad que precisan las pesquerías y comunidades capaces de recuperarse en medio de un clima cambiante. Los enfoques como la cogestión adaptativa, que se han propuesto para hacer frente a los factores de incertidumbre y hacer uso de los conocimientos y el compromiso de los usuarios de recursos a diversas escalas (Armitage *et al.*, 2008), parecen una solución prometedora. Hay que dar prioridad a la experimentación probando y analizando los nuevos enfoques. Los sistemas de gobernanza que se concentran en un aprendizaje continuo por la experiencia y en los que la política es, explícitamente, un proceso de experimentación serán los más adecuados para encarar, uno tras otro, los nuevos retos. Las políticas que hacen demasiado hincapié en la estabilidad, en la certeza y en un control que se ejerce desde arriba pueden conducir a consecuencias inesperadas porque bloquearán las pesquerías e impedirán la adaptación sostenible que se desea conseguir.

El proceso de adaptación de las pesquerías y comunidades pesqueras al cambio climático se ve facilitado –y también restringido– por diversos factores sociales, e implica decisiones valorativas y compromisos. El abandono de la pesca como actividad de subsistencia puede revelarse una opción necesaria en algunas pesquerías. Las actuaciones de adaptación –que son de naturaleza política y valorativa– subrayan la necesidad de un iniciar un proceso deliberativo justo y equitativo, por ejemplo cuando hay que dejar espacio para compensaciones recíprocas entre las acciones y las políticas al prestar asistencia a los individuos más vulnerables, o cuando se opta por intervenciones y políticas que ofrecen formas de adaptación óptimas o aseguran una capacidad de recuperación en gran escala.

Bibliografía

- Adger, W.N., Agrawala, S., Mirza, M.M.Q., Conde, C., O'Brien, K., Pulhin, J., Pulwarty, R., Smit, B. & Takahashi, K. 2007. *Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity*. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, C.E. Hanson, P.J. van der Linden, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 719–743. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Agrawal, A. & Perrin, N. 2009. Climate adaptation, local institutions and rural livelihoods. In W.N. Adger, I. Lorenzoni and K. O'Brien, eds. *Adapting to climate change: thresholds, values, governance*, pp. 350–367. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Allan, J.D., Abell, R., Hogan, Z.E.B., Revenga, C., Taylor, B.W., Welcomme, R.L. & Winemiller, K. 2005. Overfishing of inland waters. *BioScience*, 55: 1041–1051.
- Allison, E.H. & Ellis, F. 2001. The livelihoods approach and management of small-scale fisheries. *Marine Policy* 25(5): 377–388.
- Allison, E.H. & Horemans, B. 2006. Putting the principles of the sustainable livelihoods approach into fisheries development policy and practice. *Marine Policy*, 30: 757–766.
- Allison, E.H., Andrew, N.L. & Oliver, J. 2007. Enhancing the resilience of inland fisheries and aquaculture systems to climate change. *Journal of Semi-Arid Tropical Agricultural Research* 4(1). (also available at e-journal: www.icrisat.org/Journal/SpecialProject/sp15.pdf).
- Allison, E.H., Beveridge, M.C.M. & van Brakel, M. 2009. Climate change, small-scale fisheries and smallholder aquaculture. In M. Culberg, ed. *Fish, Trade and Development*. pp. 73–87. Stockholm, Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry (in press).
- Allison, E.H., Adger, W.N., Badjeck, M.-C., Brown, K., Conway, D., Dulvy, N.K., Halls, A., Perry, A. & Reynolds, J.D. 2005. Effects of climate change on the sustainability of capture and enhancement fisheries important to the poor: analysis of the vulnerability and adaptability of fisher folk living in poverty. London, Fisheries Management Science Programme MRAG/DFID, Project no. R4778J. Final technical report. 164 pp.
- Anonymous. 2007. *Symposium on cod recovery. Friday, 9 March and Saturday, 10 March 2007, Edinburgh, Scotland*. (also available at www.nsrac.org/cod-symposium/docs/Cod_Recovery_Symposium_Report.pdf).
- Armitage, D.R., Plummer, R., Berkes, F., Arthur, R.I., Charles, A.T., Davidson-Hunt, I.J., Diduck, A.P., Doubleday, N.C., Johnson, D.S., Marschke, M., McConney, P., Pinkerton, E.W. & Wollenberg, E.K. (2009) Adaptive co-management for social-ecological complexity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(2): 95–102.
- Arnell, N.W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1): 31–52.
- Arntz, W.E. 1986. The two faces of El Niño 1982 to 1983. *Meeresforschung*, 31: 1–46.
- Arntz, W.E., Gallardo, V.A., Gutierrez, D., Isla, E., Levin, L.A., Mendo, J., Neira, C., Rowe, G.T., Tarazona, J. & Wolff, M. 2006. El Niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt, California and Benguela Current upwelling ecosystems. *Advances in geosciences* 6: 243–265.
- Ayers, J.M. & Huq, S. 2009. Supporting adaptation to climate change: what role for official development assistance? *Development Policy Review* (in press).
- Badjeck, M.-C. 2008. *Vulnerability of coastal fishing communities to climate variability and change: implications for fisheries livelihoods and management in Peru*. University of Bremen, Bremen, Germany. (also available at <http://elib.suub.uni-bremen.de/diss/docs/00011064.pdf>. Ph.D thesis.)

- Badjeck, M.-C., Mendo, J., Wolff, M. & Lange, H. 2009. Climate variability and the Peruvian scallop fishery: the role of formal institutions in resilience building. *Climatic Change*, 94: 211–232.
- Baelde, P. 2007. Using fishers' knowledge goes beyond filling gaps in scientific knowledge - Analysis of Australian experiences. In N. Haggan, B. Neis and I. G. Baird. *Fishers' Knowledge in Fisheries Science and Management*. Paris, UNESCO. pp. 381–399.
- Bellwood, D.R., Hoey, A.S. & Choat, J.H. 2003. Limited functional redundancy in high diversity systems: resilience and ecosystem function on coral reefs. *Ecology Letters* 6(4): 281–285.
- Bene, C. 2003. When fishery rhymes with poverty: a first step beyond the old paradigm on poverty in small-scale fisheries. *World Development*, 31(6): 949–975.
- Berkes, F., Colding, J. & Folke, C. 2000. Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10(5): 1251–1262.
- Berkes, F., Hughes, T.P., Steneck, R.S., Wilson, J.A., Bellwood, D.R., Crona, B., Folke, C.L., Gunderson, H., Leslie, H.M., Norberg, J., Nystrom, M., Olsson, P., Osterblom, H., Scheffer, M. & Worm, B. 2006. Ecology – globalization, roving bandits, and marine resources. *Science*, 311(5767): 1557–1558.
- Berkes, F., Mahon, R., McConney, P., Pollnac, R. & Pomeroy, R. 2001. *Managing small-scale fisheries: alternative directions and methods*. Ottawa, International Development Research Centre.
- Blanco, J.A., Narváez Barandica, J.C. & Vloria, E.A. 2007. ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. *Fisheries Research*, 88: 100–108.
- Brashares, J.S., Arcese, P., Sam, M.K., Coppolillo, P.B., Sinclair, A.R.E. & Balmford A. 2004. Ecology: bushmeat hunting, wildlife declines, and fish supply in West Africa. *Science*: 1180–1182.
- British Columbia Stats. 1998. Canada. Air freight services promoting export growth and diversification. BC Stats Infoline Report: March 6, 1998. pp. 2–3. (also available at www.bcstats.gov.bc.ca/releases/info1998/in9809.pdf.)
- Broad, K., Pfaff, A.S.P. & Glantz, M.H. 1999. Climate information and conflicting goals: El Niño 1997 to 1998 and the Peruvian fishery. New York, USA. *Public philosophy, environment and social justice*. Carnegie Council on Ethics and International Affairs.
- Broad, K., Pfaff, A.S.P. & Glantz, M.H. 2002. Effective and equitable dissemination of seasonal-to-interannual climate forecasts: policy implications from the Peruvian fishery during El Niño 1997 to 1998. *Climatic Change*, 54(4): 415–38.
- Buck, E.H. 2005. Hurricanes Katrina and Rita: fishing and aquaculture industries – damage and recovery. In, *CRS Report for Congress*. Washington DC, Congressional report service, The Library of Congress.
- CAF. 2000. Las lecciones del El Niño: Memorias del fenómeno El Niño 1997 to 1998: retos y propuestas para la región Andina, volumen V: Perú. Corporación Andina de Fomento.
- Chambers, R. & Conway, G.R. 1992. *Sustainable rural livelihoods: practical concepts for the 21st century*. Brighton, UK, Institute of Development Studies discussion paper.
- Charles, A.T. 1998. Living with uncertainty in fisheries: analytical methods, management priorities and the Canadian ground fishery experience. *Fisheries Research*, 37: 37–50.
- Cinner, J., Daw, T.M. & McClanahan, T.R. 2009. Poverty and livelihood portfolios affect decisions to exit a declining artisanal fishery. *Conservation biology*, 23(1): 124–130.
- Conway, D., Allison, E., Felstead, R. & Goulden, M. 2005. Rainfall variability in East Africa: implications for natural resources management and livelihoods. *Philosophical transactions: mathematical, physical & engineering sciences*, 363: 49–54.
- Conway, P. 2007. Tipping the scales. If the world is eating more seafood, how come air cargo isn't seeing a corresponding benefit? *Air Cargo World*, February 2007. (also available at www.aircargoworld.com/archives/features/3_feb07.htm.)

- Coulthard, S. 2006. *Developing a people-centred approach to the coastal management of Pulicat Lake, a threatened coastal lagoon in South India*. Department of economics and international development, University of Bath. (Ph.D thesis.)
- Coulthard, S. 2009. Adaptation and conflict within fisheries: insights for living with climate change. In W.N. Adger, I. Lorenzoni, & K. O'Brien, eds. (2009 in press) *Adapting to climate change: thresholds, values, governance*. pp 255-268. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- de la Fuente, A. 2007. Climate shocks and their impact on assets. Human development report office. Occasional paper 2007/23. United Nations Development Programme (UNDP).
- Delgado, C.L., Wada, N., Rosegrant, M.W., Meijer, S. & Ahmed, M. 2003. *Outlook for fish to 2020: meeting global demand*. Penang, International food policy research group and Worldfish Centre. 28 pp.
- DFID. 2001. *Sustainable livelihoods guidance sheets*. London, Department for International Development.
- Dixon, P.-J., Sultana, P., Thompson, P., Ahmed, M. & Halls, A.S. 2003. Understanding livelihoods dependent on inland fisheries in Bangladesh and South East Asia. Synthesis report (draft). DFID/FMSP Project R8118.
- Easterling, W.E., Aggarwal, P.K., Batima, P., Brander, K.M., Erda, L., Howden, S.M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J-F., Schmidhuber, J. & Tubiello, F.N. 2007. Food, fibre and forest products. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. v. d. Linden & C. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 273–313. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Ellis, F. 2000. *Rural livelihoods and diversity in developing countries*. Oxford, UK, Oxford University Press.
- EEA (European Environmental Agency). 2008. *No technical obstacles to bringing international aviation and shipping under post Kyoto Protocol*. EEA press release, Wednesday, 8 October 2008. (also available at www.eea.europa.eu/highlights/no-technical-obstacles-to-bringing-international-aviation-and-shipping-under-post-kyoto-protocol).
- Eriksen, S., Brown, K. & Kelly, P.M. 2005. The dynamics of vulnerability: Locating coping strategies in Kenya and Tanzania. *Geographical Journal*, 171: 287–305.
- Eyring, V., Kohler, H.W., v. Aardenne J. & Lauer, A. 2005. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research*, 110 (D17305).
- FAO. 2003a. *Fisheries management. 2. The ecosystem approach to fisheries*. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 4, Suppl. 2. Rome, FAO. 112 p.
- FAO. 2003b. Fishery country profile: Peru. FAO, FID/CP/PER Rev. 2. Rome, FAO.
- FAO. 2005a. *Increasing the contribution of small-scale fisheries to poverty alleviation and food security*. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 10. Rome, FAO. 79 p.
- FAO. 2005b. *Review of the state of world marine fishery resources*. FAO Fisheries Technical Paper. No. 457. Rome, FAO. 235 p.
- FAO. 2006. Report of the Expert Consultation on the Economic, Social and Institutional Considerations of Applying the Ecosystem Approach to Fisheries Management. Rome, 6-9 June 2006. FAO Fisheries Report No. 799. Rome, FAO. 15p.
(also available at <http://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0673e/a0673e00.pdf>.)
- FAO. 2007a. *The state of world fisheries and aquaculture – 2006*. Rome, FAO. 162 p.
- FAO. 2007b. Information and communication technologies benefit fishing communities. *New directions in fisheries – a series of policy briefs on development issues*, 09. Rome, FAO. 16 p. (also available at www.sflp.org/briefs/eng/policybriefs.html.)
- FAO. 2007c. Reducing fisher folk's vulnerability leads to responsible fisheries: policies to support livelihoods and resource management. *New directions in fisheries – a series of policy briefs on development issues*, 01. Rome, FAO. 12 p.
(also available at <http://www.sflp.org/briefs/eng/policybriefs.html>.)

- FAO. 2007d. Building adaptive capacity to climate change. Policies to sustain livelihoods and fisheries. *New directions in fisheries – a series of policy briefs on development issues*, 08. Rome, FAO.16 p.
- FAO. 2009. FishStat Plus. Universal software for fishery statistical time series. Available at www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstat/en.
- Folke, C. 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analysis. *Global environmental change*, 16: 253–267.
- Garcia, S.M. & Grainger, R.J.R. 2005. Gloom and doom? The future of marine capture fisheries. *Philosophical transactions of the Royal Society of London – Series B: biological sciences* 360(1453): 21–46.
- Graham, N.A.J., Wilson, S.K., Jennings, S., Polunin, N.V.C., Bijoux, J.P. & Robinson, J. 2006. Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103: 8425–8429.
- Graham, N.A.J., Wilson, S.K., Jennings, S., Polunin, N.V.C., Robinson, J., Bijoux, J.P. & Daw, T.M. 2007. Lag effects in the impacts of mass coral bleaching on coral reef fish, fisheries and ecosystems. *Conservation biology*, 21: 1291–1300.
- Grandcourt, E.M. & Cesar, H.S.J. 2003. The bio economic impact of mass coral mortality on the coastal reef fisheries of the Seychelles. *Fisheries Research*, 60: 2–3.
- Hales, S., Weinstein, P. & Woodward, A. 1999. Ciguatera (fish poisoning), El Niño, and Pacific sea surface temperatures. *Ecosystem Health*, 5(1): 20–25.
- Halls, A.S., Kirkwood, G.P. & Payne, A.I. 2001. A dynamic pool model for floodplain-river fisheries. *Ecohydrology and hydrobiology*, 1 (3): 323–339.
- Hiddink, J.G. & ter Hofstede, R. 2008. Climate induced increases in species richness of marine fishes. *Global change biology*, 14(3): 453–460.
- Hilborn, R., Branch, T.A., Ernst, B., Magnusson, A., Minte-Vera, C.V., Scheuerell, M.D. & Valero, J.L. 2003. State of the world's fisheries. *Annual review of environment and resources* 28: 359–399.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R. Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A. & Hatziolos, M.E. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857): 1737–1742.
- Hsieh, C.H., Reiss, C.S., Hunter, J.R., Beddington, J.R., May, R.M. & Sugihara, G. 2006. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species. *Nature*, 443(7113): 859–862.
- Hutchings, J.A. 2000. Numerical assessment in the front seat, ecology and evolution in the back seat: time to change drivers in fisheries and aquatic sciences? *Marine ecology progress series*, 208: 299–303.
- IPCC. 2007. Summary for policymakers. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. v. d. Linden & Hanson, C.E, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 7–22. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Jahncke, J., Checkley, D.M. & Hunt, G.L. 2004. Trends in carbon flux to seabirds in the Peruvian upwelling system: effects of wind and fisheries on population regulation. *Fisheries oceanography*, 13(3): 208–223.
- Jennings, S., Kaiser, M.J. & Reynolds, J.D. 2001. *Marine fisheries ecology*. Malden, Blackwell. 417 pp.
- Jentoft, S. 2006. Beyond fisheries management: the phronetic dimension. *Marine Policy*, 30(6): 671–680.
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H.J. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(6): 1786–1793.

- Ludwig, D., Hilborn, R. & Walters, C.J. 1993. Uncertainty, resource exploitation, and conservation: lessons from history. *Science*, 260: 17+36.
- MacKenzie, B.R. & Visser, A.W. 2001. Fisheries and climate change: the Danish perspective. In A.M.K. Jørgensen, J. Fenger & K. Halsnaes, eds. *Climate change research - Danish contributions*. Copenhagen, Danish Climate Centre.
- Mahon, R. 2002. Adaptation of fisheries and fishing communities to the impacts of climate change in the CARICOM region. In *Mainstreaming adaptation to climate change (MACC)*, p.33. Washington, DC. The Caribbean Centre for Climate Change.
- Majluf, P., Barandearán, A. & Sueiro, J.C. 2005. Evaluación Ambiental del Sector Pesquero en el Perú. Washington, DC. World Bank.
- McCarthy, J., Canziani, O.S., Leary, N., Dokken, D. & White, K. 2001. *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- McClanahan, T.R., Cinner, J.E., Maina, J., Graham N.A.J., Daw, T.M., Stead, S.M., Wamukot, A., Brown, K., Ateweberhan, M., Venus, V. & Polunin, N.V.C. 2008. Conservation action in a changing climate. *Conservation letters* 1: 53–59.
- Miller, K.A. 2000. Pacific salmon fisheries: climate, information and adaptation in a conflict-ridden context. *Climatic change*, 45(1): 37–61.
- Miller, K.A. 2007. Climate variability and tropical tuna: management challenges for highly migratory fish stocks. *Marine Policy*, 31: 56–70.
- Morton, J.F. 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 19680–19685.
- Myers, R.A., Baum, J.K., Shepherd, T.D., Powers, S.P. & Peterson, C.H. 2007. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean. *Science*, 315(5820): 1846–1850.
- Nicholls, R.J., Hanson, S., Herweijer, C., Patmore, N., Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Chateau, J. & Muir-Wood, R. 2007b. *Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: exposure estimates*. Paris, OECD, OECD environment working papers No. 1 ENV/WKP (2007)1: 64 pp. (also available at www.oecd.org/dataoecd/16/58/39720578.pdf.)
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S. & Woodroffe, C.D. 2007a. Coastal systems and low-lying areas. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. v. d. Linden & C.E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 315–356. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Ñiquen, M., & Bouchon, M. 2004. Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep sea research part II: topical studies in oceanography*, 51: 563–574.
- Ordinola, N. 2002. The consequences of cold events for Peru. In M.H. Glantz, ed. *La Niña and its impacts: facts and speculation*, pp. 146–150. Toronto, Canada, New York, USA, Paris, United Nations University Press.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G-K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L., Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M-F, Yamanaka, Y. & Yool, A. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437: 681–686.
- Ostrom, E. 1990. *Governing the commons. The evolution of institutions for collective action*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Oxfam International. 2005. *The tsunami's impact on women*. Oxford, UK, Oxfam briefing note, 14 pp.
- Patz, J.A. 2000. Climate change and health: New research challenges. *Ecosystem Health* 6(1): 52–58.

- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R. & Torres, F. 1998. Fishing down marine food webs. *Science*, 279(5352): 860–863.
- Pauly, D. 2006. Major trends in small-scale marine fisheries, with emphasis on developing countries and some implications for the social sciences. *Maritime Studies*, 4(2): 7–22.
- Sadovy, Y. & Cheung, W.L. 2003. Near extinction of a highly fecund fish: the one that nearly got away. *Fish and Fisheries*, 4: 86–99.
- Saunders, C. & Hayes, P. 2007. Air freight transport of fresh fruit and vegetables: report for the International Trade Centre. Report 299. Canterbury, New Zealand. Lincoln University.
- Save the Children. 2007. *Legacy of disasters: The impact of climate change on children*. London, Save the Children Report: 16 pp.
- Scales, H., Balmford, A., Liu, M., Sadovy, Y., Manica, A., Hughes, T.P., Berkes, F., Steneck, R.S., Wilson, J.A., Bellwood, D.R., Crona, B., Folke, C., Gunderson, L.H., Leslie, H.M., Norberg, J., Nystrom, M., Olsson, P., Osterblom, H., Scheffer, M. & Worm, B. 2006. Keeping bandits at bay? *Science*, 313(5787): 612c–614.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. & Walker, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413(6856): 591–596.
- Scoones, I. 1998. *Sustainable rural livelihoods: a framework for analysis*. Brighton, UK, Institute of Development Studies.
- Shankar, B., Halls, A. & Barr, J. 2004. Rice versus fish revisited: on the integrated management of floodplain resources in Bangladesh. *Natural Resources Forum*, 28(2): 91–101.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R.J.T. & Wandel, J. 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change*, 45: 223–251.
- Smith, L.E.D., Nguyen Khoa, S. & Lorenzen, K. 2005. Livelihood functions of inland fisheries: policy implications for developing countries. *Water Policy*, 7: 359–383.
- Statistics New Zealand. 2007. Overseas cargo statistics, year ended June 2007. (also available at www.stats.govt.nz/products-and-services/hot-off-the-press/overseas-cargo/overseas-cargo-statistics-year-end-jun-07-hotp.htm?page=para002Master.)
- Thornton, P.K., Boone, R.B., Galvin, K.A., Burn-Silver, S.B., Waithaka, M.M., Kuyiah, J., Karanja, S., Gonzalez-Estrada, E. & Herrero, M. 2007. Coping strategies in livestock-dependent households in east and southern Africa: a synthesis of four case studies. *Human Ecology*, 35: 461–476.
- Thorpe, A., Reid, C., Anrooy, R.V., Brugere, C. & Becker, D. 2006. Poverty reduction strategy papers and the fisheries sector: an opportunity forgone? *Journal of International Development*, 18(4): 489–517.
- Tietze, U., Thiele, W., Lasch, R., Thomsen, B. & Rihan, D. 2005. *Economic performance and fishing efficiency of marine capture fisheries*. FAO fisheries technical paper, 482, vii + pp. 68.
- Tompkins, E.L. & Adger, W.N. 2004. Does adaptive management of natural resources enhance resilience to climate change? *Ecology and Society*, 9(2): 10. (Also available at www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art10.)
- Troade, J.-P. 2000. Adaptation opportunities to climate variability and change in the exploitation and utilisation of marine living resources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61: 101–112.
- Turner, R.A., Cakacaka, A., Graham, N.A.J., Polunin, N.V.C., Pratchett, M.S., Stead, S.M. & Wilson, S.K. 2007. Declining reliance on marine resources in remote South Pacific societies: ecological versus socio-economic drivers. *Coral Reefs*, 26: 997–1008.
- Tyedmers, P.H., Watson, R. & Pauly, D. 2005. Fuelling global fishing fleets. *Ambio* 34(8): 635–638.
- Vincent, K. 2006. *Gender and adaptation to climate change in South Africa*. Norwich, UK, University of East Anglia, School of Environmental Sciences. (Ph.D thesis.)
- Whittingham, E., Campbell, J. & Townsley, P. 2003a. *Poverty and reefs, vol 1: A global overview*. Exeter, UK, DFID-IMM-IOC-UNESCO, 260 pp.

Worm, B., Barbier, E.B., Beaumont, N., Duffy, J.E., Folke, C., Halpern, B.S., Jackson, J.B.C., Lotze, H.K., Micheli, F., Palumbi, S.R., Sala, E., Selkoe, K.A., Stachovicz, J.J. & Watson, R. 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314: 787–790.

World Bank. 2000. Managing change in Pacific Island economies. *In*. Volume IV: Adapting to climate change – cities, seas, and storms. Washington, D.C. The World Bank, Papua New Guinea and Pacific country unit.

El cambio climático y la acuicultura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación

Sena S. De Silva
Red de centros de acuicultura de Asia y el Pacífico
PO Box 1040, Kasetsart Post Office
Bangkok 10903, Tailandia
Correo electrónico: sena.desilva@enaca.org

Doris Soto
Departamento de Pesca y Acuicultura
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Roma 00153, Italia
Correo electrónico: doris.soto@fao.org

De Silva, S.S. y Soto, D. 2009. El cambio y la acuicultura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación. En K. Cochrane, C. De Young, D. Soto y T. Bahri (eds). Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura, N° 530. Roma, FAO. pp. 169-236.

ABSTRACT

Este estudio trata las repercusiones potenciales del cambio climático en el subsector de la acuicultura, y en menor medida los efectos de la acuicultura en el cambio climático. Para lograr estos objetivos analíticos, y con vistas a abordar las potenciales medidas de adaptación y mitigación, se examina el estado del subsector en relación con el suministro total de productos pesqueros para alimentación, los cambios recientes que han tenido lugar en dicho suministro y otros aspectos relacionados.

En la actualidad, la contribución de la acuicultura al abastecimiento de productos pesqueros para alimentación se acerca al 45 por ciento, proporción que también queda reflejada en el aporte creciente de la acuicultura a las cifras totales relacionadas con la pesca en el producto interno bruto (PIB) de algunos de los principales países productores. Considerando el crecimiento de la población humana y el estancamiento del crecimiento de la pesca de captura, se espera que para satisfacer la demanda futura el suministro de alimentos provenientes de la acuicultura debe aumentar.

La acuicultura no se practica de forma homogénea a través del globo, y para evaluar sus repercusiones potenciales en el cambio climático este estudio examina las actividades acuícolas en relación con tres regímenes climáticos –tropical, subtropical y templado–; en relación con tres tipos de medio ambiente –aguas marinas, dulces y salobres–; y en relación con divisiones geográficas por continentes. Se observa que la acuicultura es una actividad predominante en las regiones climáticas tropicales y subtropicales y que, geográficamente, lo es en la región de Asia. Además, la mayor cantidad de productos cultivados corresponde a los peces, moluscos, crustáceos y algas marinas, pero con predominio de las especies que se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica. Dada la concentración geográfica y climática de las actividades

acuícolas, y con el propósito de hacer frente y mitigar los impactos del cambio climático en estas regiones, ha sido necesario adoptar, por el momento, un enfoque centrado en el desarrollo de estrategias de adaptación, en especial si se busca reducir la distancia que separa el suministro de la demanda de pescado mediante la acuicultura. Sin embargo, no es posible desconocer el potencial de crecimiento de la acuicultura en otras regiones.

El estudio pone de relieve los principales elementos del cambio climático que podrían repercutir potencialmente en la producción de acuicultura –la subida del nivel del mar y el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de pluviosidad monzónica, los fenómenos climáticos extremos y el estrés hídrico– y evalúa las razones de estas repercusiones. Las repercusiones directas de la acuicultura se consideran de acuerdo con la zona en que se manifiesten, debido a que probablemente los diferentes elementos del cambio climático se experimentarán en grados diversos en las distintas zonas climáticas.

Por ejemplo, se predice que el recalentamiento mundial y el consiguiente aumento de las temperaturas del agua podrían tener consecuencias significativas y perjudiciales en la acuicultura en zonas templadas porque a raíz de tales aumentos se excedería el registro de temperaturas óptimas que soportan los organismos que se cultivan en la actualidad. Sin embargo, estas repercusiones negativas podrían verse compensadas por los efectos positivos del cambio climático, por ejemplo el aumento del crecimiento y de la producción en las zonas tropicales y subtropicales. Tales efectos positivos no ocurrirán probablemente en ausencia de algunas repercusiones negativas resultantes de otros elementos relacionados con el cambio climático (p. ej., el aumento de la eutrofización en las aguas continentales). En ambos casos se consideran posibles medidas de adaptación para reducir o para maximizar las repercusiones de que se trate. También se intenta examinar los impactos del cambio climático en diferentes sistemas de cultivo, por ejemplo en los sistemas continentales y marinos y en diferentes formas de cultivo tales como los cultivos en jaulas. Por otra parte, es probable que las enfermedades que se declaran en el sector de la acuicultura aumenten tanto en su incidencia como en su severidad.

Casi el 65 por ciento de la producción de acuicultura proviene de aguas continentales y se concentra principalmente en las regiones tropicales y subtropicales de Asia. En el sector acuícola, las repercusiones del cambio climático resultantes del recalentamiento mundial serán probablemente leves en las actividades que se desarrollan en dichos sistemas y, si fuesen positivas, derivarán del aumento de las tasas de crecimiento de las poblaciones en cultivo. Asimismo, el cambio climático repercutirá en la disponibilidad hídrica y en los patrones climáticos, por ejemplo los acontecimientos de pluviosidad extrema, y exacerbará los procesos de eutrofización y estratificación en las aguas estáticas (lénticas).

La influencia de la disponibilidad hídrica en la acuicultura es difícil de proyectar. Algunas medidas de adaptación relacionadas con la localización de las granjas se discuten aquí. Sin embargo, fundándose en las prácticas actuales, en particular en lo que respecta a la acuicultura continental de peces –basada predominantemente en especies que se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica–, el aumento de la disponibilidad de fitoplancton y zooplancton a consecuencia de la eutrofización podría traducirse en un incremento de la producción. En cambio, para hacer frente a los fenómenos climáticos extremos en el caso de los cultivos marinos en jaula, las medidas de adaptación consistirán en introducir tecnologías mejoradas.

Es probable que a consecuencia del aumento del nivel de los mares las aguas saladas invadan las zonas de delta tropicales donde se desarrolla una considerable actividad acuícola. Como medida de adaptación para hacer frente a las repercusiones asociadas, se hará necesario trasladar tierras adentro algunas instalaciones donde se cultivan especies escasamente tolerantes a la salinidad. Igualmente, la acuicultura es percibida como una actividad de adaptación destinada a proporcionar medios de vida alternativos cuando, debido a la invasión de agua salada o a las frecuentes inundaciones costeras, ya no fuese posible o rentable realizar actividades agrícolas terrestres.

Se estima que una de las repercusiones indirectas más importantes del cambio climático en la acuicultura derivaría de la escasa disponibilidad de materia prima, harina y aceite de pescado para la fabricación de piensos piscícolas. También otros tipos de materias primas podrán verse

afectados, y las repercusiones negativas se harán sentir probablemente con mayor agudeza en las regiones templadas donde el cultivo de peces se basa totalmente en especies carnívoras. Algunas medidas de adaptación se sugieren para contrarrestar estos impactos.

Se exponen los costos ecológicos del cultivo de diferentes especies y sistemas de acuicultura, y se los contrasta con otras fuentes de producción de proteínas animales, examinándose, en cada caso, el aporte indirecto a las emisiones de carbono. Como medida de mitigación para limitar la contribución a las emisiones que derivan de las actividades acuícolas se propone que el consumidor sea informado del índice de emisiones de carbono asociadas con los diferentes productos, así como se hace para indicar la trazabilidad. Se demuestra en este contexto que, en términos de energía, la acuicultura es, en conjunto, una actividad menos costosa y que podría contribuir más al secuestro de carbono que otros sistemas de cultivos agrícolas terrestres.

El documento concluye con una revisión más general de medidas de adaptación de orientación política que pueden ser implementadas a nivel regional, nacional o a un sitio específico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen muy especialmente al equipo de la Red de Centros de Acuicultura de Asia y el Pacífico, y en particular a M. Phillips, C.V. Mohan, T. Nguyen y S. Wilkinson por comentarios al borrador de este texto, y a P. Ying por la ayuda en la elaboración de las ilustraciones. Se agradecen igualmente los valiosos comentarios aportados por U. Wijkström, C. Brugère y F. Jara, y la edición realizada por C. Attwood.

ÍNDICE

1. Introducción	173
2. Producción y demanda de pescado comestible	175
2.1 Demanda de pescado comestible	175
2.2 Producción de pescado de consumo: hipótesis cambiantes	177
2.3 Seguridad alimentaria y pescado	178
3. Producción de acuicultura	181
3.1 Distribución climática de la producción	181
3.2 Distribución ambiental y climática de la acuicultura	182
3.3 Distribución climática, nacional y regional de la acuicultura	183
3.4 Valor de los productos de acuicultura	183
3.5 Tendencias del crecimiento en la acuicultura	184
3.6 Acuicultura y PIB	185
4. Síntesis de estudios anteriores sobre los efectos del cambio climático en la acuicultura y las pesquerías	185
5. Repercusiones del cambio climático en la acuicultura	187
5.1 Cambios climáticos importantes que podrían repercutir potencialmente en la acuicultura	187
5.2 Aspectos de la vulnerabilidad de la acuicultura al cambio climático	188
5.3 Repercusiones directas	189
5.3.1 Repercusiones directas conocidas hasta la fecha	189
5.3.2 Repercusiones potenciales	189
5.4 Repercusiones indirectas del cambio climático en la acuicultura	201
5.4.1 Suministros de harina y aceite de pescado	201
5.4.2 Otros ingredientes de los piensos usados en la acuicultura	204
5.4.3 Suministros de morralla, de pez de poco valor y de pez forraje	204
5.4.4 Repercusiones en las enfermedades	206
5.4.5 Repercusiones en la biodiversidad	208
5.5 Repercusiones sociales del cambio climático en la acuicultura	210
6. Repercusiones potenciales de la acuicultura en el cambio climático	213
6.1 Descripción comparativa de las emisiones de carbono y la contribución a los gases de efecto invernadero derivadas de la zootecnia y la acuicultura	213
6.1.1 Captura de carbono	214
6.2 Estimación de la contribución potencial de la acuicultura al cambio climático	216
7. Otras medidas de adaptación	218
7.1 Medidas institucionales, normativas y de planificación	218
7.1.1 Seguros en la acuicultura	219
7.1.2 Investigación y transferencia de tecnología	220
7.1.3 Zonificación y seguimiento en la acuicultura	221
8. Conclusiones	222
9. Bibliografía	229

1. INTRODUCCIÓN

Se predice que la población mundial alcanzará los 9 000 millones de personas para el año 2050, y que esta expansión acarreará un aumento de las necesidades mundiales de alimentos durante la primera mitad del presente siglo (McMichael, 2001). La capacidad de mantener los suministros alimentarios para una población creciente y expectante dependerá de la posibilidad de maximizar la eficiencia y sostenibilidad de los métodos de producción. Según los pronósticos, los cambios climáticos mundiales afectarán negativamente dichos suministros.

De acuerdo con un análisis reciente de la producción alimentaria mundial realizado en el ámbito del informe especial sobre situaciones hipotéticas relativas a las emisiones, llevado a cabo por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sobre el sistema de comercio de alimentos, el mundo estará en condiciones de atender adecuadamente sus necesidades alimentarias hasta muy avanzado el próximo siglo –una conclusión alentadora. Sin embargo, el modelo que demostraba esos resultados se basaba en la producción de los países desarrollados, que se espera serán los más beneficiados con el cambio climático. Esto compensaba las disminuciones proyectadas en los cultivos alimentarios terrestres en los países en desarrollo, e implica que las diferencias regionales en la producción de los cultivos probablemente se acentuarán con el tiempo (Parry *et al.*, 2004). La acuicultura –una industria característica del mundo en desarrollo– propondrá quizá una situación hipotética diferente en lo que respecta a su contribución a las necesidades alimentarias humanas futuras.

El ser humano y los peces han estado inseparablemente vinculados durante milenios, no solo porque el pescado es una importante fuente de proteína animal y de medios de subsistencia y seguridad alimentaria para millones de personas, sino también desde un punto de vista evolutivo. Efectivamente, según algunos investigadores, el desarrollo del cerebro humano, y por lo tanto el estado actual del hombre, está relacionado con fuentes de alimentos ricos en ácidos grasos n-3 (DHA, EPA) y n-6 (AA) (PUFA¹ por su sigla en inglés) ya que el pescado constituía la mayor parte de la dieta de nuestros antepasados. Existen a este respecto pruebas cuantiosas que muestran que el *Homo sapiens* no se desarrolló en un hábitat de sabana sino en uno rico en recursos de pescados y mariscos (Crawford *et al.*, 1999).

Numerosos estudios médicos han confirmado los aspectos positivos del pescado en una dieta sana, en el crecimiento físico y en el bienestar general. Está abundantemente documentado que las carencias de algunos ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) se asocian con importantes riesgos de salud (Stansby, 1990; Ulbricht y Southgate, 1991; de Deckere *et al.*, 1998), y que es posible aliviar algunas enfermedades y cuadros clínicos mediante suplementos de PUFA (Hunter y Roberts, 2000). La toma de conciencia acerca de la importancia de los ácidos grasos en la alimentación humana ha determinado que el consumo de pescado aumente en la mayor parte de las sociedades y en particular en el mundo desarrollado. Además, el pescado proporciona a muchas comunidades rurales en el mundo en desarrollo una fuente a veces única de proteínas animales con frecuencia frescas, a un precio asequible.

De todas las fuentes de proteínas alimentarias animales destinadas al consumo humano, solo el pescado se captura predominantemente en el medio silvestre, contrariamente a otros productos que provienen del cultivo. En general, ha habido cambios significativos en los patrones mundiales de producción y consumo de pescado (Delgado *et al.*, 2003) a lo largo de un período de 25 años en beneficio de los países en desarrollo y de China. Este escenario de variaciones ha estado acompañado de un enfoque en el que los suministros de la pesca de captura han sido sustituidos gradualmente por suministros provenientes de la piscicultura y/o del cultivo, los cuales

¹ Poly unsaturated fatty acids

representan en la actualidad cerca del 50 por ciento del consumo mundial de pescado (Figura 1, FAO, 2008b).

Durante la última década, principalmente a nivel de público, el cambio climático y sus consecuencias han conducido a que se formularan conclusiones bastante indiscriminadas y poco rigurosas. Objeto de definiciones e interpretaciones diversas fundadas en datos y análisis científicos detallados y robustos, el cambio climático es aceptado como real, si bien hay aún quienes la refutan (p. ej. Lomborg, 2001). Por lo tanto, existe acuerdo en que la humanidad sufrirá de muchas formas las repercusiones del cambio climático y que la producción de alimentos y los ambientes asociados con la producción se verán particularmente afectados (IPCC, 2007). En el presente trabajo de síntesis se adopta la definición de cambio climático² elaborada por el IPCC (IPCC, 2007). Igualmente, la forma en que la comunidad mundial adopte colectivamente medidas para mitigar los factores que causan el cambio climático y consiga adaptarse para hacer frente a las alteraciones determinará la intensidad de las repercusiones del cambio climático en los distintos sectores durante las próximas décadas y quizá también a lo largo de los próximos siglos. Sin embargo, aquí se tratarán esencialmente las medidas de adaptación destinadas a encarar el cambio climático.

Es importante destacar igualmente que las consideraciones sobre el cambio climático y la producción de peces, aparte de unos pocos estudios específicos (véase la Sección 4), solo han recibido hasta ahora escasa atención en comparación con todos los demás sectores de la producción primaria. La pesquería en cuanto tal se menciona una sola vez en el *Informe de síntesis* del IPCC (2007), lo que indica que, por lo que se refiere a la circulación de retorno meridional del Atlántico, es probable que ocurran cambios en la productividad ecosistémica y en las pesquerías.

Las modificaciones más notables y significativas asociadas con el cambio climático son el aumento gradual de las temperaturas mundiales medias (p. ej. Zwiers y Weaver, 2000) y de las concentraciones de gases de efecto invernadero (Brook, Sowers y Orchard, 1996). Ambos efectos han sido acertadamente sintetizados y documentados (IPCC, 2007). La Tierra ha experimentado en la actualidad más inundaciones (en 1960 aproximadamente 7×10^6 personas resultaron afectadas, pero hoy la cifra es de 150×10^6 al año), huracanes y monzones irregulares que durante las décadas anteriores. Los debates y controversias versan sin embargo sobre el grado de los cambios de los principales componentes, tales como la temperatura mundial, la subida del nivel del mar y el alcance de los efectos de las precipitaciones que estamos experimentando.

El recalentamiento mundial y la subida del nivel del mar son fenómenos que ocurrirán, pero ¿hasta qué punto se verificarán estos cambios durante las próximas décadas? Las opiniones concuerdan en que el planeta se calentará hasta en $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ durante este siglo, pero si las concentraciones de gases de efecto invernadero siguen aumentando al ritmo actual, la subida de las temperaturas será de $3 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura promedio de la Tierra se sitúa alrededor de los $15 \text{ }^\circ\text{C}$, pero si el hombre permite que ascienda un solo grado o que llegue a aumentar incluso en $3 \text{ }^\circ\text{C}$, esta variación determinará la suerte de miles de especies y quizá de miles de millones de personas (Flannery, 2005; Kerr, 2006).

Como ocurre en otros sectores de la producción primaria, se espera que la producción de peces sea afectada por el cambio climático. Según los pronósticos las repercusiones tendrán distintas formas y ocurrirán en diversos lugares con variada intensidad. A diferencia de otros sectores de la producción de alimentos de origen animal, la producción de peces comprende dos subsectores: la pesca de captura, que depende excesivamente de las poblaciones silvestres cuyo reclutamiento y presencia se deben a procesos naturales y que en su mayor parte (aproximadamente en un 85-90 por

² «El término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (p. ej. mediante análisis estadísticos) por cambios en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente decenios o períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana.»

ciento) residen en los océanos; y la producción de peces cultivados o producido mediante procesos piscícolas, cuya importancia relativa va creciendo, y que se conoce popularmente como «acuicultura».

Este estudio de síntesis se enfoca en los impactos potenciales del cambio climático en la acuicultura. Con este objeto, se analiza, además de otros aspectos, la situación del subsector acuícola con relación al suministro total de peces y los cambios recientes que afectan el suministro revisando los problemas y posibles medidas de adaptación y de mitigación. Como los datos disponibles eran sumamente limitados, los autores no han tratado de construir modelos de los cambios sugeridos ni de las repercusiones mencionadas en este análisis.

2. PRODUCCIÓN Y DEMANDA DE PESCADO

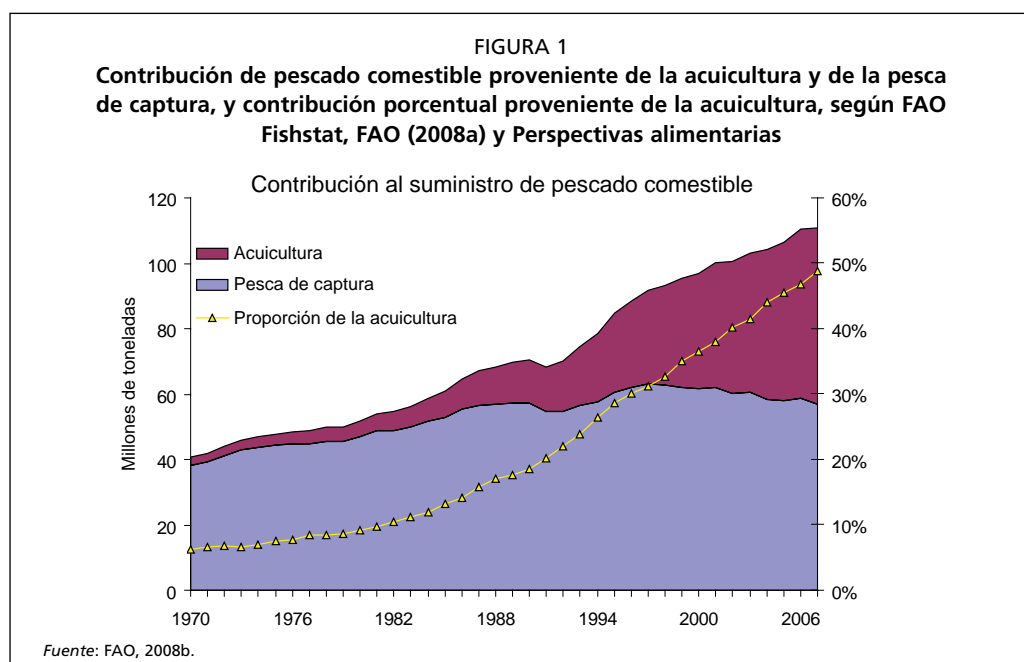
Un trabajo de síntesis sobre el cambio climático y sus repercusiones en la producción de pescado debe tomar en consideración las necesidades potenciales de los peces para el consumo humano y las cantidades disponibles para los procesos de transformación, por ejemplo producción de harina y aceite, en especial en relación con los volúmenes producidos de estos productos. Estos productos se destinan a la fabricación de alimento para animales domesticados y constituyen la base de una proporción significativa de los piensos para organismos acuáticos cultivados, en particular camarones y peces carnívoros, y en menor medida para el cultivo intensivo de especies omnívoras como tilapias y carpas.

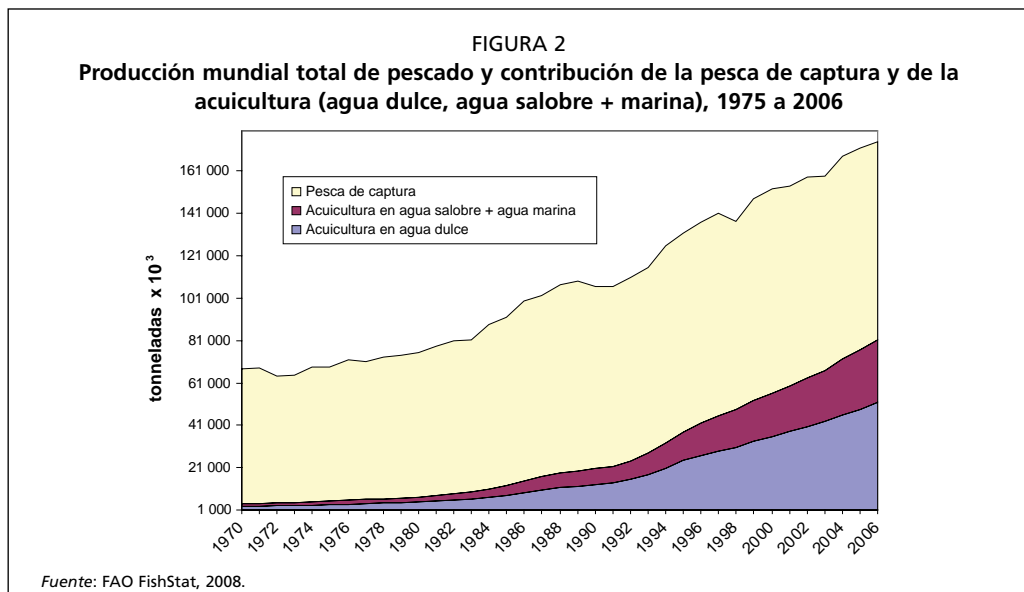
2.1 Demanda de pescado comestible

La producción de peces cultivados constituye en la actualidad cerca del 50 por ciento del pescado que se consume en todo el mundo (FAO, 2009), y el objetivo es que para 2020 llegue al 60 por ciento (FAO, 2008; Figura 1).

El aporte de peces cultivados al suministro mundial de pescado se ha incrementado significativamente en los últimos diez años, alcanzando el 47 por ciento en 2006 (Figura 2). Dentro de estas cantidades, la producción en agua dulce ha alcanzado el 30 por ciento.

Considerando que el componente «pesca de captura» del suministro pesquero ha alcanzado casi un nivel de saturación de aproximadamente 100 millones de toneladas anuales, y que cerca del 25 por ciento es enviado a las industrias de transformación, y





por consiguiente no está disponible para el consumo humano (Jackson, 2006; Hassan *et al.*, 2007), es poco probable que –quizá con la excepción de posibles progresos registrados en el sector de las pesquerías continentales en los trópicos que parecen cobrar impulso– la cesta alimentaria humana registre nuevos incrementos de productos provenientes de la pesca de captura. Esto quiere decir que se deberá recurrir sobre todo a la acuicultura para hacer frente al crecimiento de las necesidades de peces para consumo humano como consecuencia de la expansión demográfica y del aumento del consumo de pescado per cápita en el seno de algunos sectores (debido a los beneficios para la salud derivados de una alimentación a base de pescado).

Se han formulado numerosas predicciones sobre la disponibilidad futura de pescado y éstos son claramente resumidos en las Tablas 1 y 2 (Siriwardene, 2007, comunicación personal). En todos los casos, es evidente que la demanda de pescado ha aumentado significativamente en el tiempo, que esta demanda ha variado según los continentes y ha estado relacionada con los pronósticos de crecimiento de la población.

La demanda en el sector de la acuicultura destinada a suplir las crecientes necesidades de pez comestible ha sido estimada en cerca de 60 millones de toneladas, es decir un incremento de casi el 43 por ciento de la producción correspondiente a 2003. En la Tabla 3 se presenta el desglose proyectado por continentes. Si se pretende que la demanda de pez comestible deba ser satisfecha para 2020, la producción de acuicultura

TABLA 1
Proyecciones de la demanda de pescado comestible en relación con los pronósticos de crecimiento de la población

Continente	Población (x 10 ³)		Suministro de pescado (2001)		Demanda en 2020 (toneladas) ^d
	2005 ^a	2020 ^a	Total (toneladas) ^b	Per cápita (kg) ^c	
África	905 936	1 228 276	7 066 301	7,8	9 580 553
Asia	2 589 571	3 129 852	36 512 951	14,1	44 130 913
China	1 315 844	1 423 939	33 685 606	25,6	36 452 606
Europa	728 389	714 959	14 422 102	19,8	14 156 838
América Latina y el Caribe	561 346	666 955	4 939 845	18,8	5 869 204
América del Norte	330 608	375 000	5 719 518	17,3	6 487 500
Oceanía	33 056	38 909	760 288	23,0	894 907
Todo el mundo	6 464 750	7 577 889	105 375 425	16,3	123 519 591

a- Naciones Unidas; b- población en 2005 x suministro per cápita en 2001; c- FAO; d- población en 2020 x suministro per cápita en 2001.

Fuente: Tomado con modificaciones de Siriwardene, P.P.G.S., comunicación personal.

TABLA 2
Demanda mundial proyectada de pescado comestible

Pronósticos	Necesidades		Necesidades estimadas por ser satisfechas mediante la acuicultura (x 10 ⁶ toneladas)	
	Consumo per cápita (kg/año)	Demanda total (x 10 ⁶ toneladas)	Considerando las pesquerías:	
			En crecimiento (0,7 por ciento)	Estancadas
Línea de referencia ^a	17,1	130	53,6 (1,8%)	68,6 (3,5%)
Más baja	14,2	108	41,2 (0,4%)	48,6 (1,4%)
Más alta	19,0	145	69,5 (3,2%)	83,6 (4,6%)
2010 ^b	17,8	121	51,1 (3,4%)	59,7 (5,3%)
2050	30,4	271	177,9 (3,2)	209,5 (3,6%)
1999 ^c	15,6	127	45,5 (0,6%)	65,1 (2,0%)
2030	22,5	183	102,0 (3,5%)	121,6 (4,2%)

a- Delgado et al. (2003), hasta 2020; b- Wijkström, 2003.

Fuente: Tomado con modificaciones de Brugère y Ridler, 2004.

TABLA 3
Demanda de producción proyectada en el sector de la acuicultura, 2020

Continente	Demanda de pescado comestible en 2020 (t)	Producción de acuicultura en 2003 (t) ^a	Demanda en el sector de la acuicultura en 2020 (t) ^b	Cambio necesario (%)
África	9 580 553	520 806	3 035 058	482,8
Asia	44 130 913	8 686 136	16 304 098	87,8
China	36 452 838	28 892 005	31 659 237	9,6
Europe	14 156 188	2 203 747	1 937 833	-12,1
Latin America and Caribbean	5 869 204	1 001 588	1 930 947	92,8
North America	6 487 500	874 618	1 642 600	87,8
Oceania	894 907	125 241	259 860	107,5
World	123 519 591	42 304 141	60 448 307	42,9

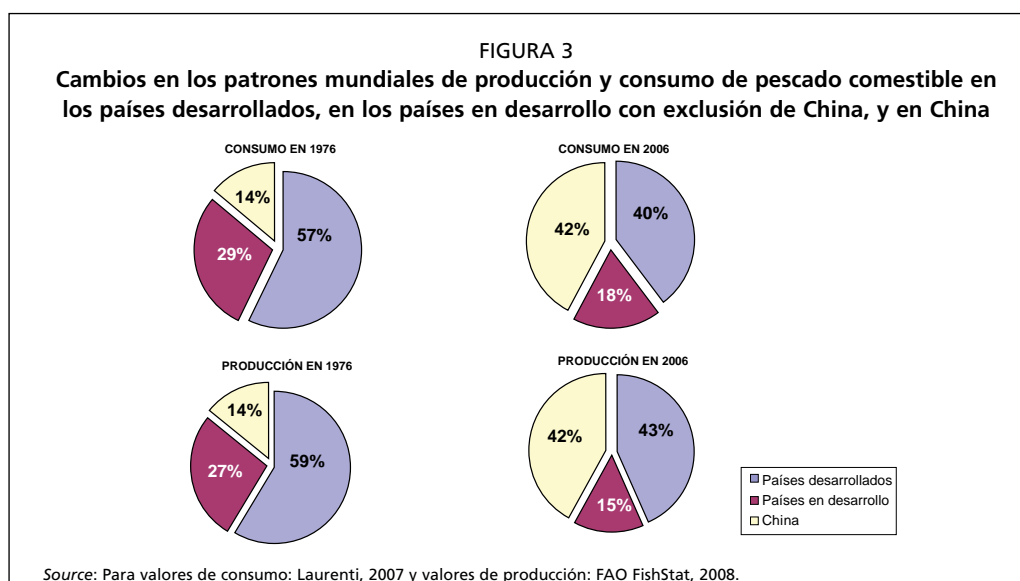
a- FAO Stats; b- 2020 Demanda de pescado menos la producción de pescado actual estimada.

Fuente: Modificado de la comunicación personal de Siriwardene, P.P.G.S.

deberá incrementarse en medida variable en todos los continentes, excepto en Europa. La anterior es una situación hipotética que es preciso tomar en consideración al evaluar las repercusiones del cambio climático en la acuicultura.

2.2 Producción de pescado de consumo: hipótesis cambiantes

La Figura 3 ilustra los principales cambios en el suministro y disponibilidad mundial de pez comestible y en los patrones de consumo durante las últimas tres décadas.



El incremento gradual del papel de la acuicultura en el suministro mundial de pez comestible (Figura 1), y en particular en el sector continental (Figura 2), contrasta con el estancamiento registrado en las pesquerías de captura, en las cuales cerca del 85 a 90 por ciento de los suministros provienen de recursos marinos. No obstante, se trata de detalles aproximados que no reflejan con exactitud los pormenores que se requieren para investigar y/o evaluar las principales repercusiones del cambio climático en los suministros de alimentos de consumo humano y/o la acuicultura.

2.3 Seguridad alimentaria y pescado

De acuerdo con la definición aceptada, «existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana» (FAO, 2003). Según Sen (1981), la seguridad alimentaria puede conseguirse directa o indirectamente, mediante:

- derechos basados en la producción: el sujeto produce alimentos para la satisfacción de sus propias necesidades;
- derechos basados en el comercio: venta o trueque de bienes u otros activos;
- derechos basados en el trabajo: venta del propio trabajo;
- derechos transferenciales: recepción de obsequios o transferencias de alimentos.

La seguridad alimentaria es un derecho humano universal. Las cuestiones relativas a la seguridad alimentaria han sido materia de arduos debates y han resultado en principios generales, resumidos por Kurien (2005), aceptados por el grueso de la sociedad.

Se ha convenido en que el insumo diario mínimo recomendado de calorías para llevar una vida sana se cifra en 1 800, cantidad que el Servicio de Investigaciones Económicas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos³ ha elevado a 2 100 calorías. Se ha estimado que hay en el mundo mil millones de personas desnutridas en 70 países de bajos ingresos; cabe destacar que la mayoría de ellas vive en zonas rurales. Durante las últimas dos décadas, el número de personas hambrientas en Asia ha registrado una disminución. La contribución del pescado a la ingesta calórica diaria no es necesariamente significativa, pero en la actualidad se estima que supone el 20 por ciento de la ingesta de proteínas animales, y mucho más en el mundo en desarrollo. El pescado proporciona también, entre otros elementos, micronutrientes esenciales en forma de vitaminas, minerales (p. ej. fuentes óptimas de yodo y selenio) y algunas coenzimas (Q10).

Por lo general, el consumo de pescado por sí mismo no garantiza seguridad alimentaria, principalmente porque su contenido de calorías es bajo. No obstante, la producción pesquera, la pesca de captura y la acuicultura contribuyen significativamente a la seguridad alimentaria al proveer medios de subsistencia y al asegurar la generación de ingresos. Se estima que 35 millones de personas están empleadas directamente en el sector pesquero, y que de éstas aproximadamente el 80 por ciento trabaja en la pesca y el 20 por ciento en la acuicultura (FAO, 2003b). La mayor parte de los medios de vida que dependen de las pesquerías se concentra en los países en desarrollo y en particular en Asia. Es también importante darse cuenta de que, a través de los sectores de apoyo doméstico y otros sectores auxiliares, el sector pesquero proporciona sustento a varias veces el número de los individuos que encuentran empleo en él directamente (Williams, 2004).

En términos generales, el pescado y el comercio pesquero se consideran importantes fuentes directas e indirectas para la consecución de la seguridad alimentaria, pese a que hasta recientemente la relación del pescado con la seguridad alimentaria se enfocaba en los aspectos directos del consumo (Kurien, 2005). Kurien destaca que en 10 de 11 países en desarrollo, la principal fuente de divisas es el pescado, lo que indica la

³ www.ers.usda.gov/Briefing/GlobalFoodSecurity

RECUADRO 1

En la mayor parte de las empresas acuícolas en Asia y América Latina las mujeres son las trabajadoras predominantes en el sector de la elaboración. Esta circunstancia, que permite a la mujer conquistar su autonomía en los hogares rurales, contribuye además a la seguridad alimentaria y a la armonía y bienestar de la familia. Tal factor ha sido escasamente tomado en cuenta en los análisis tradicionales relativos a la acuicultura. Las fotos muestran las mujeres que trabajan en elaboración en plantas acuícolas en Vietnam (camarón) y Myanmar (labeo roho).



importancia de este producto para garantizar la seguridad alimentaria a nivel agregado. Es crecientemente evidente que la acuicultura está superando a la pesca de captura en lo que respecta a la producción, y que el sector acuícola representa cerca del 45 por ciento del total de las actividades pesqueras en Asia y casi el 70 por ciento en la República Popular de China. Esta ganancia en la importancia relativa del sector quedará reflejada indirectamente en el comercio asociado con la acuicultura y por ende en la importancia relativa de la acuicultura por su aporte a la seguridad alimentaria.

Con el término de «trabajadores pesqueros» se designa comúnmente a los operarios que llevan a cabo los servicios poscosecha en cualquier economía pesquera. Esta categoría incluye sobre todo las personas que intervienen en la clasificación, envasado y transporte del pescado; las que realizan los distintos procesos relacionados con la elaboración para prolongar la vida útil del pescado y añadirle valor; y las que suministran el pescado a los exportadores y elaboradores y a los mercados mayoristas y minoristas, o directamente a los consumidores. Parece que las personas que trabajan en las industrias de transformación y de fabricación de piensos no forman tradicionalmente parte de esta categoría.

Sin embargo, se sabe que este sector proporciona asimismo un gran número de puestos de trabajo que contribuyen a la seguridad alimentaria general. En este contexto algunos de los nuevos productos acuícolas que se destinan a la exportación suponen oportunidades de empleo cuantiosas para las comunidades rurales relativamente empobrecidas. Se pueden citar como ejemplos la acuicultura del bagre (*Pangasianodon hypophthalmus*) y el labeo roho (*Labeo rohita*) en Vietnam y Myanmar, respectivamente. En este último país se han instalado 80 plantas de elaboración para atender el creciente mercado de exportación de labeo roho (Aye *et al.*, 2007) cuyo valor asciende en la actualidad a cerca de 70 millones de dólares EE.UU. (cantidad equivalente a 60 000 toneladas de ejemplares de 1 a 2 kg). En promedio, se requieren ocho equipos de trabajadores para elaborar una tonelada de labeo roho, lo que representa empleos en este sector para cerca de 1 300 a 1 400 personas durante todo el año. Vinh Hoan Corporation, una de las mayores empresas elaboradoras de bagre del delta del Mekong, emplea a 2 500 personas, el 80 por ciento de las cuales son mujeres⁴ que trabajan en tres

⁴ www.dotvn.com

turnos y elaboran 200 toneladas diarias, con un rendimiento aproximado de 80 toneladas de producto elaborado exportable (Vinh Hoan Corporation, sin fecha). En base a los datos anteriores, el sector del bagre en el delta del Mekong, que produjo 1,2 millones de toneladas en 2007, cantidad que fue elaborada y exportada casi en su totalidad, habría proporcionado empleos durante todo el año a 40 000 - 45 000 personas, es decir una cantidad muy significativa de empleos directos procedentes del subsector dentro de una determinada área geográfica. Sin lugar a dudas, este alto grado de empleo tiene un impacto significativo en la seguridad alimentaria de esa región.

En el caso de los productos cultivados de alto valor, como el salmón y el camarón (y cada vez más la tilapia), la mayor parte de la producción se elabora y se exporta. Aunque su costo energético general es significativamente más elevado, los productos de alto valor representan un número considerable de oportunidades de medios de vida y contribuyen por lo tanto a la seguridad alimentaria general. Por ejemplo, en Tailandia, la mayor nación productora de camarón de cultivo (375 320 toneladas, valoradas en 1 196 millones de dólares EE.UU.), solo el 30 por ciento del camarón se consume fresco; el resto de la producción se procesa fresco-enfriado o congelado (37 por ciento) y/o enlatado (29 por ciento) (Fishery Information Technology Centre, 2006). Aquí también el sector de la acuicultura proporciona considerables oportunidades de medios de vida y contribuye a la seguridad alimentaria. Otro ejemplo es el de la salmicultura en Chile. En 2007, el salmón fue el tercer producto de exportación más importante de Chile, con un valor de 2 200 millones de dólares EE.UU. Ese año, la industria salmonera dio empleo a aproximadamente 53 000 personas, lo que supuso un impulso considerable para las economías locales y las zonas rurales donde se cultiva el salmón. La participación de la mujer en la industria salmonera, en particular en las plantas elaboradoras, es también muy alta y representa aproximadamente el 50 por ciento del total del sector.

La pobreza está vinculada con la seguridad alimentaria y la malnutrición; las personas pobres tienen menos posibilidades de lograr la seguridad alimentaria. La malnutrición a menudo conduce a enfermedades. En el Tabla 4 se resume la situación de malnutrición por región.

El nivel de malnutrición es evidente en la región de Asia y el Pacífico, e indica que la pobreza en Asia meridional es considerable. Una constante en la mayor parte de la región de Asia y el Pacífico es la dependencia relativamente elevada del pescado como fuente principal de proteína animal. Si bien la malnutrición alcanza sus niveles más altos en el África subsahariana, en esa región la dependencia del pescado es menor y en ella la acuicultura es apenas incipiente. Si se desarrollase de forma sostenible, el sector de la acuicultura podría proporcionar beneficios significativos a la región y producir un desarrollo económico nutricional y social directo.

TABLA 4

Población mundial total en millones (2000 a 2002); número de personas desnutridas, y expresado como porcentaje de la población total

Región/subregión	Población total	Personas desnutridas	
		Total	Porcentaje
Mundo en desarrollo	4 796,7	814,6	17
Asia y el Pacífico	3 256,1	519	16
Asia oriental	1 364,5	151,7	11
Asia sudoriental	522,8	65,5	13
Asia meridional	1 363,3	301,1	22
América Latina y el Caribe	521,2	52,9	10
Cercano Oriente y África del Norte	399,4	39,2	10
África subsahariana	620,0	203,5	33
Países en transición	409,8	28,3	7

Fuente: Extraído de PMA (Programa Mundial de Alimentos, sin fecha).

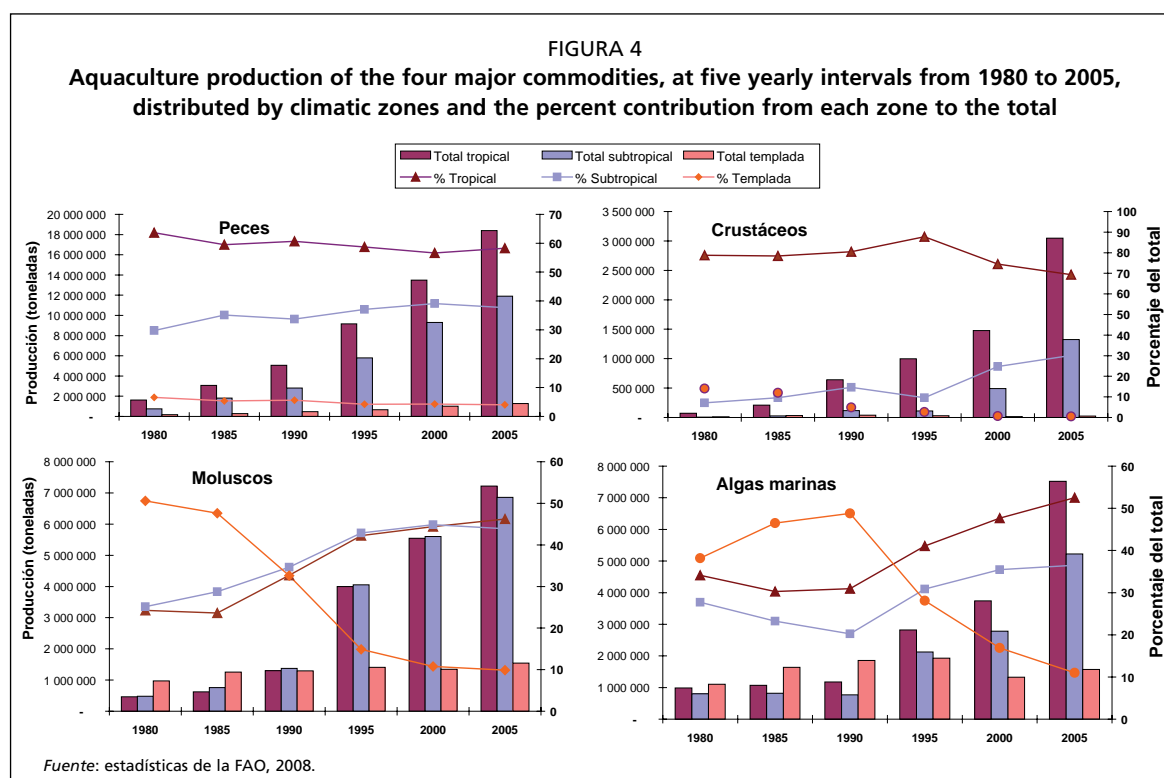
A lo largo de los últimos 15 años, la acuicultura ha registrado un crecimiento relativamente rápido en América Latina y el Caribe, sobre todo en Brasil, Chile, Ecuador, Honduras y México (Morales y Morales, 2006). América del Sur y África son los continentes que tienen el más alto crecimiento potencial del sector acuícola, mientras que en Asia el índice de crecimiento de la acuicultura está disminuyendo (De Silva, 2001). Es probable que en las próximas décadas los progresos que tengan lugar en el sector acuícola en América del Sur y África contribuyan aún más a la seguridad alimentaria y al alivio de la pobreza mundial. En países como Chile, Ecuador y Honduras, los productos cultivados requieren ser elaborados y transportados (además de otros servicios conexos) y por consiguiente contribuirán de manera indirecta a la seguridad alimentaria.

3. PRODUCCIÓN DE ACUICULTURA

Con el objeto de evaluar los cambios potenciales que han tenido lugar en el sector de la acuicultura bajo diferentes hipótesis del cambio climático, es importante hacer referencia a las tendencias anteriores de la producción de acuicultura en base a los regímenes climáticos aproximados respecto a las regiones tropical, subtropical y templada.

3.1 Distribución climática de la producción

Hasta ahora, la mayor parte de los análisis de la producción de acuicultura (véase por ejemplo FAO, 2007, entre otros) se han basado en los países, territorios, continentes y regiones. Desde el punto de vista de los impactos del cambio climático, la utilidad de este tipo de análisis será reducida a menos que tales países o territorios se consideren individualmente. Así pues, en el presente estudio de síntesis se consideran las tendencias de la producción de acuicultura a intervalos quinquenales (1980 a 2005) para cada uno de los productos de cultivo (peces, moluscos, crustáceos y algas marinas) de acuerdo con las estadísticas de la FAO (FAO, 2008) para tres regímenes climáticos: tropical (23°N a 23°S), subtropical (24-40°N y 24-40°S) y templado (>40°N y >40°S) (Figura 4). Es cierto que este no es un enfoque perfecto. Por ejemplo, la producción acuícola en China se desarrolla (aproximadamente entre 20 y 42°N y 75 y 130°E) a través de zonas



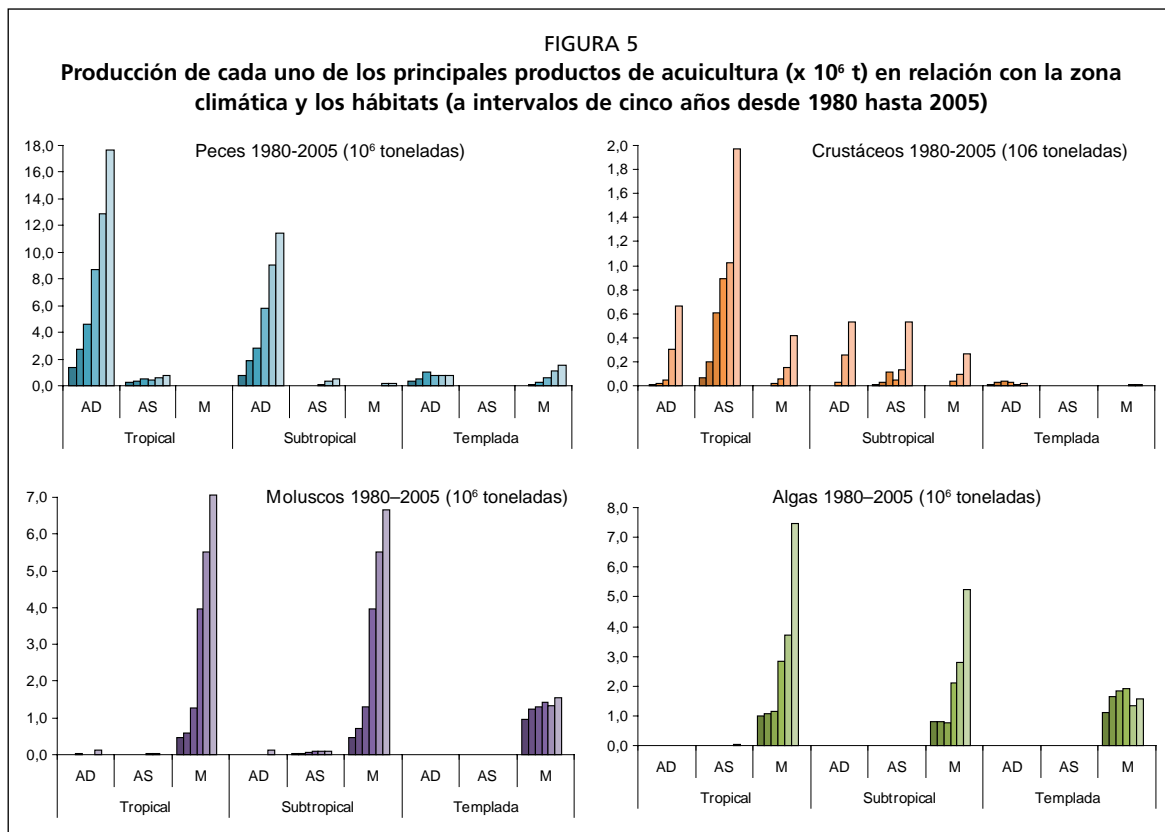
que abarcan muchos grados de latitud. En este análisis se parte del supuesto que el 60 por ciento de la producción acuícola de China se considera subtropical, y el resto tropical.

El análisis muestra que los principales grupos de productos cultivados provienen principalmente de las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Figura 4). Para tres de los cuatro principales grupos de productos, la producción en zonas tropicales representa más del 50 por ciento, correspondiendo a los crustáceos la proporción más alta, con aproximadamente 70 por ciento. Es importante notar la tendencia en la producción de moluscos y algas marinas cultivadas en regiones templadas durante los últimos 25 años. Hasta hace cerca de una década, el cultivo de estos dos grupos era predominante en esta región climática, pero desde entonces ha descendido por debajo del nivel de las otras dos regiones y en la actualidad su contribución representa alrededor del 10 por ciento del total. Esto se debe en gran parte a la alta tasa de crecimiento de la acuicultura en las regiones tropical y subtropical más que a una reducción de la producción absoluta en la región templada.

3.2 Distribución ambiental y climática de la acuicultura

La acuicultura se desarrolla en tres ambientes básicos: aguas dulces, aguas marinas y aguas salobres. Cada uno de estos ambientes ocurre en los tres regímenes climáticos considerados. En la Figura 5 se presenta la producción de cada uno de los principales productos de acuicultura (a intervalos de cinco años desde 1980 hasta 2005, expresados en 10^6 toneladas) en relación con el régimen climático y los ambientes de aguas continentales, marinas y salobres.

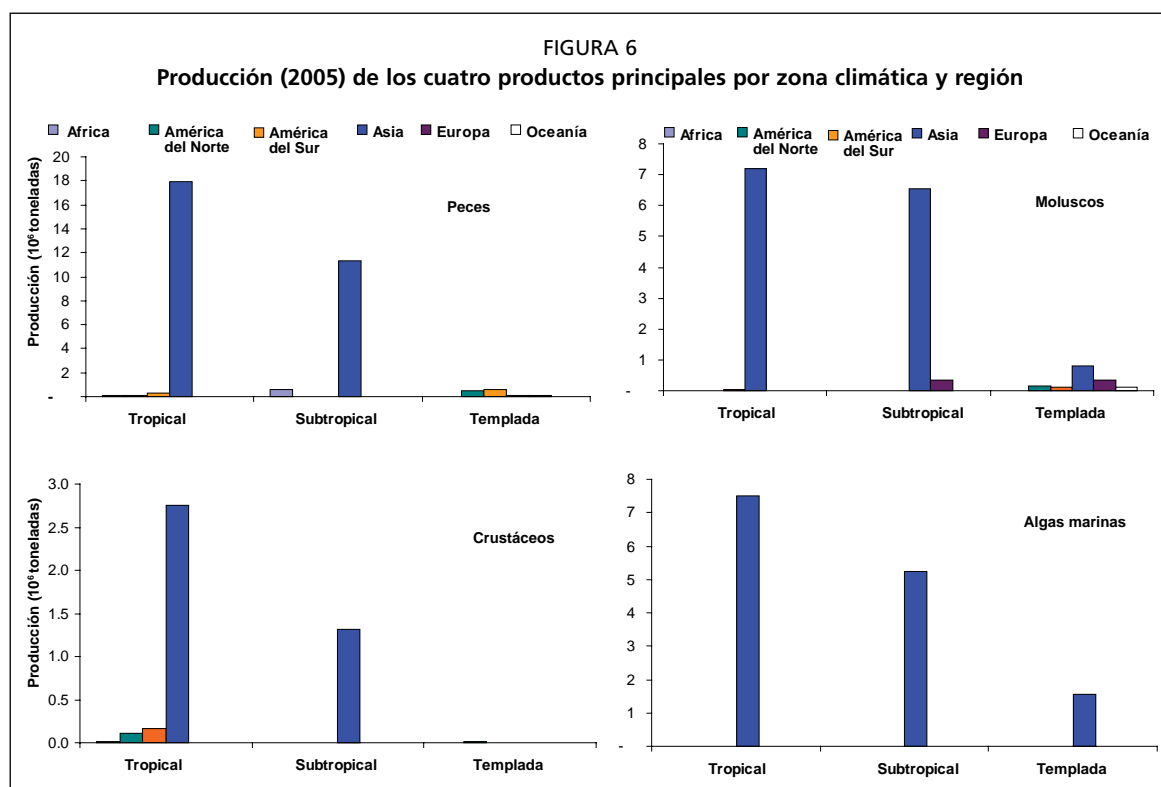
Resulta evidente que, aparte de los moluscos, el cultivo de todos los demás productos tiene lugar principalmente en los trópicos, seguido por el cultivo en los sub-trópicos, y mucho menos por el que se desarrolla en las regiones templadas. En esencia, a lo largo de los últimos 25 años el aporte porcentual de los cuatro principales productos cultivados en las regiones templadas, salvo quizá los peces, ha disminuido



debido a los aumentos substanciales de la producción en las otras regiones (Figura 5). Asimismo, en todas las regiones la producción total de peces supera ampliamente la de otros productos, y esta tendencia es constante a lo largo de los años. El cultivo de peces tiene lugar principalmente en aguas dulces, mientras que el cultivo de crustáceos y moluscos se realiza en aguas salobres y marinas, respectivamente (Figura 5). Aquí, una vez más, las tendencias de producción son más bien constantes a lo largo del período de 25 años. Por consiguiente, es importante observar que las repercusiones del cambio climático, si es que las hay, producirán probablemente efectos netos más significativos en el subsector acuícola de aguas dulces en las regiones tropicales y subtropicales que en cualquier otro lugar porque es en ellos donde se concentra la producción.

3.3 Distribución climática, nacional y regional de la acuicultura

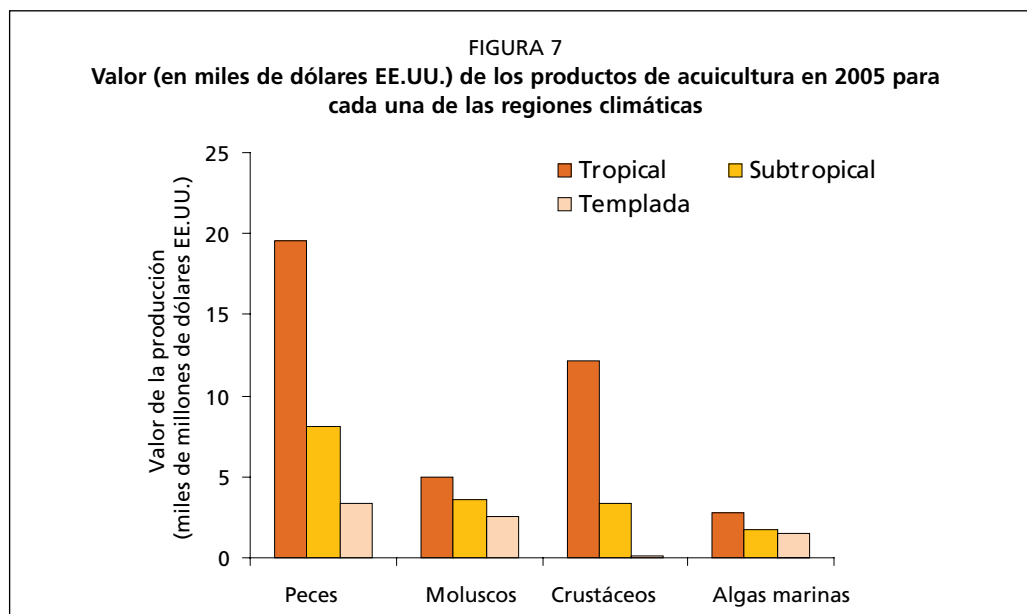
Con el objeto de obtener una imagen de la importancia de la distribución de la producción de acuicultura en relación con las regiones climáticas (tropical, subtropical y templada) por continentes, se analizó la producción de 2005 relativa a los cuatro productos principales con arreglo a estos dos factores (Figura 6). La figura muestra



claramente que la producción de los cuatro principales productos de cultivo en los tres regímenes climáticos considerados tiene lugar sobre todo en Asia. Las diferencias de producción entre Asia y los demás continentes son sumamente grandes, y superan el 90 por ciento en todos los casos. Por consiguiente, las estrategias de adaptación que se necesita llevar a cabo para contrarrestar las repercusiones potenciales del cambio climático en la acuicultura deberían tener como objetivo inicial el continente asiático.

3.4 Valor de los productos de acuicultura

El valor de los productos de acuicultura producidos en las diferentes zonas climáticas siguió una tendencia similar a la de la producción general de cada uno de ellos. Las tendencias del valor que se muestran en la Figura 7, revelan que en 2005 los productos provenientes de la región tropical alcanzaron el valor más alto, y que a esta región seguían las regiones subtropicales y finalmente la zona templada. En lo que se refiere



al valor de las algas marinas y los moluscos cultivados, las diferencias entre zonas climáticas eran mucho más pequeñas que para los peces y los crustáceos, y en ellas el valor de los respectivos productos superaba en el 50 por ciento el total (Figura 7). Por otra parte, aunque en la región templada los peces representan sólo cerca del 4 por ciento de la producción mundial, su valor equivale a cerca del 11 por ciento del valor mundial total de la producción de peces; ello indica que en esta región climática se producen predominantemente peces de mayor valor. Por lo tanto, en la zona templada los cambios en la producción por tonelada de pescado pueden tener repercusiones potenciales mayores en los medios de vida.

3.5 Tendencias del crecimiento en la acuicultura

Se reconoce a la acuicultura como el sector de producción primaria de más rápido crecimiento en las últimas tres décadas, habiendo registrado una tasa de expansión anual de casi el 10 por ciento. Sin embargo, los datos tendenciales indican que el ritmo de crecimiento está disminuyendo (Figura 8), y se admite generalmente que en la mayoría de las regiones el crecimiento del sector no puede mantener el mismo ritmo (De Silva,

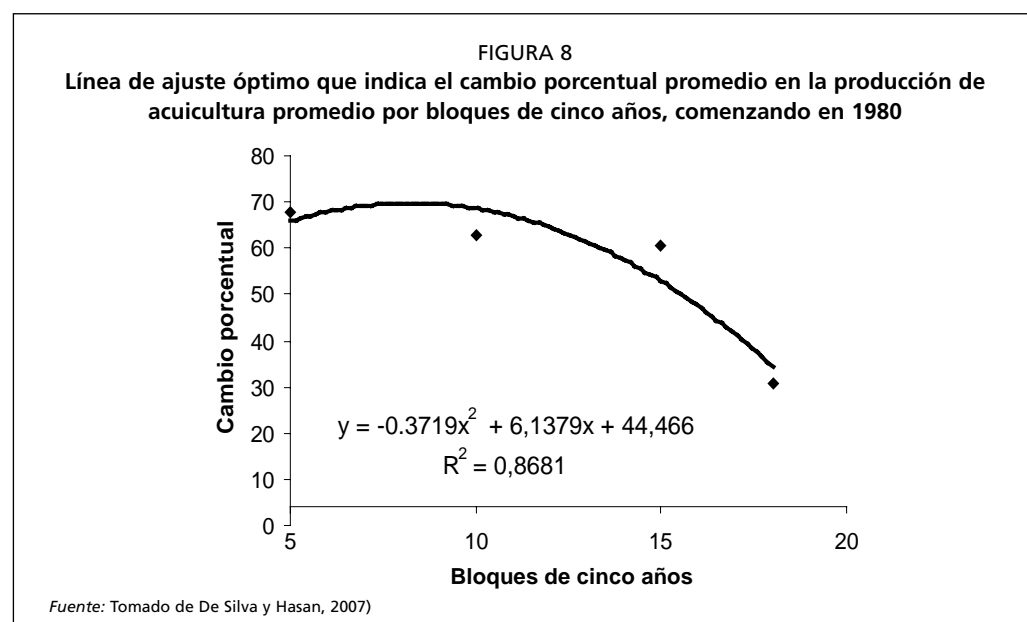


TABLA 5

Contribución relativa estimada de la pesca de captura y la acuicultura al PIB en países seleccionados de Asia y en Chile (América del Sur) (2004-2006)

País	Pesca de captura	Acuicultura
Bangladesh#	1,884	2,688
República Popular de China	1,132	2,618
Indonesia#	2,350	1,662
República Democrática Popular Lao	1,432	5,775
Malasia#	1,128	0,366
Filipinas#	2,184	2,633
Tailandia	2,044	2,071
Vietnam*	3,702	4,00
Chile**	2,17	2,63

Fuentes: # Sugiyama, Staples y Funge-Smith, 2004; * Viet Nam Net Bridge; ** www.subpesca.cl

2001; FAO, 2007). Es necesario no perder de vista estas tendencias de crecimiento al tomar en cuenta las posibles repercusiones del cambio climático en la acuicultura y su expansión potencial.

3.6 Acuicultura y PIB

Kurien (2005) ha puesto de relieve la creciente importancia del comercio pesquero mundial, mostrando que la contribución de la pesca al Producto Interno Bruto (PIB) de muchos países en desarrollo ha superado la de otros productos básicos tradicionales como el café y el té. En 10 de 11 países en desarrollo, la pesca es la principal fuente de ingresos de exportación cumpliendo una función esencial en la seguridad alimentaria a nivel agregado. En Asia, independientemente de los regímenes climáticos (Figura 6), la contribución de la acuicultura a la producción total de pescado ha aumentado en las dos últimas décadas (Figura 1), una tendencia que se ha observado en muchos de los principales países productores de productos acuícolas de ese continente (De Silva, 2007).

Esta tendencia se refleja en el PIB de algunos de los mayores países productores de productos acuícolas de la región y en otros lugares en los cuales la acuicultura ocupa un lugar cada vez más importante en el sector piscícola (Tabla 5), con repercusiones positivas en la seguridad alimentaria.

4. SÍNTESIS DE ESTUDIOS ANTERIORES SOBRE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ACUICULTURA Y LAS PESQUERÍAS

Aparte de algunos estudios específicos, se ha otorgado escasa atención a la acuicultura y las pesquerías en los principales análisis sobre los impactos del cambio climático en la producción pesquera. Esto es especialmente evidente al comparar con la atención que han recibido todos los demás sectores de la producción primaria y también en relación con otros problemas destacados como la influencia de los cambios climáticos en la biodiversidad (IPCC, 2002). Es interesante observar que los problemas del cambio climático relacionados con la pesca fueron ya examinados más de una década atrás (Wood y McDonald, 1997). En este tratado, las influencias del cambio climático en la pesca se abordaron desde el punto de vista de la fisiología, con técnicas para analizar los efectos de la temperatura en los índices de crecimiento (Jobling, 1997), el desarrollo larval (Rombough, 1997) y el rendimiento reproductivo (Van der Kraak y Pankhurst, 1997).

Dos informes de política respecto a las amenazas que pesan sobre las pesquerías y la acuicultura estudiaron la importancia de estas últimas para las comunidades cuyos medios de vida dependen de los sectores pesquero y acuícola; y materia de una breve reseña fue la necesidad de diseñar estrategias de adaptación a los efectos del cambio climático (WFC, 2006). A este estudio siguió un informe en el que se declaraba

que ambos sectores presentan oportunidades de adaptación, por ejemplo mediante la integración de las actividades de acuicultura y la agricultura, y se sugería que la ordenación pesquera debía dejar de buscar rendimientos máximos para dedicarse a las investigaciones sobre métodos de adaptación (WFC, 2007). Además, el informe planteaba la necesidad de llevar a cabo más estudios destinados a encontrar formas novedosas para mejorar la capacidad de adaptación de pescadores y acuicultores.

Sharp (2003) analizó los efectos futuros del cambio climático en las pesquerías regionales examinando los cambios climáticos a lo largo de la historia y evaluando la dinámica climática en relación con la evolución de las especies, la sociedad y la variabilidad de las pesquerías. El autor catalogó las repercusiones del cambio climático en las pesquerías regionales y señaló que las siguientes pesquerías eran las que mayormente respondían a las variables climáticas (en orden descendente de susceptibilidad):

- pesquerías en pequeños ríos y lagos, en regiones en las que los cambios de temperatura y precipitaciones son mayores; pesquerías que se desarrollan en zonas económicas exclusivas (ZEE), donde los mecanismos de acceso reducen artificialmente la movilidad de los grupos de pescadores y las flotas y su capacidad de ajuste a las fluctuaciones en la distribución y abundancia de las especies;
- pesquerías en grandes lagos y ríos;
- pesquerías en estuarios, en especial cuando existen especies que no presentan patrones de dispersión o de migración de desove, o en estuarios que han sufrido las repercusiones del aumento del nivel del mar o una reducción del flujo fluvial;
- pesquerías de alta mar. Además, se indicó que las pesquerías marinas que realizan una producción en gran escala no estarán sujetas a padecer las repercusiones inmediatas del cambio climático, y que las más expuestas son las que han sido afectadas por intervenciones humanas, por ejemplo por la construcción de embalses o por las restricciones de acceso de que son objeto los movimientos migratorios que tienen lugar aguas arriba o aguas abajo, o por otros problemas relacionados con el crecimiento demográfico y la manipulación del hábitat por el hombre (Sharp, 2003).

El estudio de Handisyde *et al.* (2006) es probablemente el más exhaustivo sobre la acuicultura y el cambio climático. En ese trabajo de síntesis, los autores analizan la influencia en la acuicultura mundial de los cambios climáticos anunciados tales como la temperatura, precipitaciones, subida del nivel del mar, fenómenos extremos, variabilidad climática y corrientes oceánicas. También abordan las repercusiones en la productividad acuícola, los medios de vida que dependen de la acuicultura y las influencias indirectas de la disponibilidad de harina y aceite de pescado en la acuicultura. Se incluye un amplio estudio de modelización y una serie de submodelos que abarcaban la exposición a los fenómenos climáticos extremos, la capacidad de adaptación y la vulnerabilidad. Completa el trabajo un estudio de caso sobre Bangladesh, país que posee una de las zonas deltaicas más extensas del mundo que es particularmente susceptible a la subida del nivel del mar y a los daños meteorológicos graves.

También existe un tratado detallado sobre la influencia del cambio climático en la acuicultura canadiense (2WE Associate Consulting, 2000).

En su examen de las repercusiones físicas y ecológicas del cambio climático en la pesca y la acuicultura, Barrange y Perry indican que sobre esta materia las incertidumbres y vacíos de investigación son cuantiosos (véase el Capítulo 1 de esta Sección). Un asunto especialmente preocupante son las interacciones sinérgicas entre los actuales factores de estrés, incluyéndose entre éstos la capacidad de resiliencia de las pesquerías y ecosistemas y la capacidad de adaptación y evolución de los organismos marinos y acuáticos en función de los cambios climáticos.

Roessig *et al.* (2004) pusieron de manifiesto la necesidad de intensificar las investigaciones sobre la fisiología y ecología de los peces marinos y estuarinos, en

particular en los trópicos. En cuanto a las pesquerías de aguas continentales, Ficke, Myrick y Hansen (2007) indicaron que los efectos generales del cambio climático en los sistemas de aguas dulces se manifestarán a través del aumento de la temperatura del agua, la disminución de los niveles de oxígeno y el aumento de toxicidad de los agentes contaminantes. Además, se llegó a la conclusión de que la alteración de los regímenes hidrológicos y el aumento de la temperatura de las aguas subterráneas repercutirán sobre las comunidades ícticas en los sistemas lóticos. En los sistemas lénticos la eutrofización podría exacerbarse y la estratificación hacerse más pronunciada, con consecuencias negativas para las cadenas tróficas y la disponibilidad y calidad de los hábitats. Nunn *et al.* (2007) llevaron a cabo un estudio de caso más específico sobre el éxito del reclutamiento en los ciprínidos en los ríos bajos en relación con los cambios potenciales producidos por el cambio climático en la corriente del Golfo.

Se han realizado varios estudios sobre el cambio climático y las repercusiones climáticas en la pesca que podrían afectar indirectamente a la acuicultura, por ejemplo en lo que respecta a la disminución de la productividad oceánica (Schmittner, 2005).

En esta fase del presente trabajo no se trata de revisar estos estudios de manera exhaustiva puesto que los más pertinentes se mencionan en la Sección 5.4. Sin embargo, se llama la atención sobre algunos ejemplos selectos. Atkinson *et al.* (2004) describieron la disminución de la densidad del krill Antártico (*Euphausia superba*) y el aumento correspondiente de sálpidos (sobre todo *Salpa thompsonii*), uno de los principales organismos que se alimentan de krill. Se supone que esta tendencia se exacerbará probablemente a causa del cambio climático, del aumento de la temperatura del mar y de la disminución de las masas de hielo polar. Se ha abogado por el uso de krill como fuente esencial de proteína para reemplazar la harina de pescado en los piensos utilizados en la acuicultura (Olsen *et al.*, 2006; Suontama *et al.*, 2007), pero la tendencia actual parece indicar que esto no es posible (De Silva y Turchini, 2008). Esta situación se ve complicada por el hecho de que el krill es el alimento principal de las ballenas misticetas y de muchas especies de peces silvestres.

5. REPERCUSIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ACUICULTURA

Las repercusiones del cambio climático podrían manifestarse directa o indirectamente, y no todos los aspectos del cambio climático se traducirán en repercusiones sobre la acuicultura. Así como sucede con cualquier práctica de cultivo, las prácticas acuícolas se definen espacial y temporalmente y por su alcance, y son bastante manejables. Además, la producción de acuicultura se concentra en ciertas regiones climáticas y en ciertos continentes (véanse las Secciones 3.1, 3.2, 3.3), con un conjunto de prácticas sectoriales bien definidas.

Puede que estos acontecimientos, al menos durante las fases tempranas de la historia reciente del sector, hayan sido impulsados por atributos culturales, tales como el hecho de «vivir en contacto con el agua» y otras tendencias tradicionales afines con arreglo a las cuales eran algunos los grupos que se dedicaban a la piscicultura. Sin embargo, es preciso reconocer que la expansión de la acuicultura en las diferentes regiones puede de hecho sufrir modificaciones por causa del cambio climático, en particular en las zonas y regiones donde la acuicultura misma puede proporcionar posibilidades de adaptación para otros sectores (p. ej. la agricultura en zonas costeras).

5.1 Cambios climáticos importantes que podrían repercutir potencialmente en la acuicultura

No todos los cambios climáticos repercutirán por igual directa o indirectamente en la acuicultura. Asimismo, no resulta sencillo discernir los efectos causales de las repercusiones de los diferentes elementos del cambio climático en la acuicultura y en la pesca. Más aún, no es posible atribuir las repercusiones potenciales de las actividades agrícolas a un único factor del cambio climático. En la mayor parte de los casos, se trata

de una cadena de efectos difíciles de entender que se convierten en elementos causales, y no de un factor reconocible único. Basándose en los pronósticos del IPCC (2007), los elementos del cambio climático que probablemente repercutan en la acuicultura se pueden resumir como sigue:

- Recalentamiento mundial: las opiniones concuerdan en que el recalentamiento de la Tierra será de 1,1 °C durante este siglo, pudiendo incluso alcanzar los 3 °C.
- Subida del nivel del mar: la subida del nivel del mar estará relacionada con el recalentamiento mundial. Según cálculos del IPCC, el nivel de los océanos subirá entre 10 y 100 cm durante el presente siglo; la expansión térmica supondrá 10 a 43 cm de esta subida, y el derretimiento de los glaciares, 23 cm. El aumento del nivel del mar influirá profundamente en las regiones de deltas, determinará la invasión de las tierras por aguas salinas y ocasionará alteraciones bióticas.
- Productividad de los océanos y cambios en los patrones de circulación: se predicen cambios importantes en la productividad de los océanos y en los patrones de circulación; los océanos que más sufrirán repercusiones serán el Atlántico septentrional (Schmittner, 2005) y el Índico (Gianni, Saravanan y Chang, 2003; Goswami *et al.*, 2006). Los cambios tendrán efectos en las pesquerías y en otros grupos de biomasa planctónica vegetal y animal y se traducirán en modificaciones de las cadenas tróficas.
- Cambios en los monzones y aparición de fenómenos climáticos extremos: frecuencia de las inundaciones, variaciones en los patrones de las lluvias monzónicas (Goswami *et al.*, 2006) y la tempestuosidad general.
- Estrés hídrico: el IPCC (2007) estima que para 2020 entre 75 y 250 millones de personas en África experimentarán estrés hídrico y que, según las proyecciones, en particular en las grandes cuencas hidrográficas en Asia central, meridional, oriental y sudoriental la disponibilidad de agua dulce disminuirá. América del Sur y Europa estarán en una situación mejor.
- Cambios en los regímenes hidrológicos de las aguas continentales: es probable que a causa del recalentamiento atmosférico ocurran cambios que podrían repercutir en las actividades de acuicultura tanto en ambientes lénticos como lóticos. Por ejemplo, los procesos de eutrofización podrían exacerbase y la estratificación podría acentuarse, con los consiguientes efectos en las cadenas tróficas y en la disponibilidad y calidad de los hábitats (Ficke, Myrick y Hansen, 2007). Estos dos aspectos podrían a su vez pesar sobre las actividades de acuicultura, en especial la acuicultura continental practicada en jaulas y corrales.

5.2 Aspectos de la vulnerabilidad de la acuicultura al cambio climático

A diferencia de otros animales de granja, todas las especies de animales acuáticos cultivadas destinadas al consumo humano son poiquilotermas. Por consiguiente, cualquier aumento o disminución de la temperatura del hábitat podría influir considerablemente en el metabolismo general y por lo tanto en los índices de crecimiento y de producción total; en la reproducción, en la estacionalidad y posiblemente también en la eficacia reproductiva incluyendo fecundidad relativa y número de desoves (véase Wood y McDonald, 1997); y en el aumento de la susceptibilidad a enfermedades e incluso a agentes tóxicos (Ficke, Myrick y Hansen, 2007).

Los niveles inferiores y superiores de temperaturas letales y la gama de temperaturas óptimas para las especies de peces varían considerablemente (Tabla 6). Es por lo tanto inevitable que las variaciones de temperatura inducidas por el cambio climático repercutan en la distribución espacial de las actividades de acuicultura que son específicas de las especies.

Además, la acuicultura se lleva a cabo en tres ambientes muy diferentes –aguas dulces, aguas marinas y aguas salobres– y cada uno de ellos es apropiado para un determinado grupo de especies con rasgos fisiológicos particulares. Es probable que

TABLA 6
Tolerancia térmica de algunas especies cultivadas seleccionadas pertenecientes a diferentes zonas climáticas

Modalidad climática/zona térmica común/especies	Temperatura letal incipiente (°C)		Rango óptimo (°C)
	Baja	Alta	
Tropical			
Tilapia (<i>Tilapia zillii</i>)	7	42	28,8–31,4
Tilapia de Guinea (<i>Tilapia guineensis</i>)	14	34	18–32
Aguas templadas (subtropicales)			
Anguila europea (<i>Anguilla anguilla</i>)	0	39	22–23
Bagre de Canal (<i>Ictalurus punctatus</i>)	0	40	20–25
Templada/polar			
Trucha ártica (<i>Salvelinus alpinus</i>)	0	19,7	6–15
Trucha arco iris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	0	27	9–14
Salmón del Atlántico (<i>Salmo salar</i>)	-0,5	25	13–17

Fuente: tomado con modificaciones de Ficke, Myrick y Hansen, 2007.

el cambio climático ocasiona importantes modificaciones sobre todo en cuanto a salinidad y temperatura en los hábitats de aguas salobres e influya en consecuencia en la producción de acuicultura en esos ambientes. A este respecto, el sector acuícola actual podría responder a ciertos fenómenos como el grado de alzamiento del nivel del mar o la penetración de aguas salobres tierra adentro reubicando las granjas o recurriendo a la cría de cepas más tolerantes a la salinidad. Entre temperatura y salinidad existen efectos interactivos de influencia recíproca que varían mucho en los organismos acuáticos cultivados y deberán ser tomados en cuenta a la hora de diseñar medidas de adaptación.

5.3 Repercusiones directas

Así como ocurre en el sector de la pesca, los impactos del cambio climático en la acuicultura serán probablemente tanto positivos como negativos y resultarán de los efectos directos e indirectos sufridos por los recursos naturales de los que depende la acuicultura. Los principales problemas serán el agua, la tierra, las semillas, los piensos y la energía.

5.3.1 Repercusiones directas conocidas hasta la fecha

Hasta la fecha, solo se ha informado de un caso de repercusión directa en la acuicultura del cambio climático inducido por el hombre: la niebla tóxica que se extendió sobre Asia sudoriental durante El Niño de 2002. Aunque no fue atribuido a las actividades humanas en sí, el acontecimiento tuvo por consecuencia la reducción en un 10 por ciento de la propagación de la luz solar y el calor en la baja atmósfera y el océano. Según algunos autores, el fenómeno contribuyó a un episodio de floración de dinoflagelados que perjudicó la acuicultura en zonas costeras desde Indonesia hasta la República de Corea causando daños por millones de dólares EE.UU. (Swing, 2003),

Algunos desastres climáticos recientes con repercusiones considerables en las comunidades costeras, tales como el ciclón que afectó Myanmar en 2008 o los frecuentes huracanes que se han registrado en el Caribe, se han vinculado con el cambio climático pero sin que al respecto haya consenso científico.

5.3.2 Repercusiones potenciales

En las siguientes secciones se tratará de evaluar las repercusiones del cambio climático en diferentes prácticas de acuicultura en varios ambientes, y en algunos casos en

relación con los productos básicos. Cuando es posible, también se abordan las medidas de adaptación más inmediatas.

5.3.2.1 Recalentamiento mundial y repercusiones asociadas al aumento de la temperatura

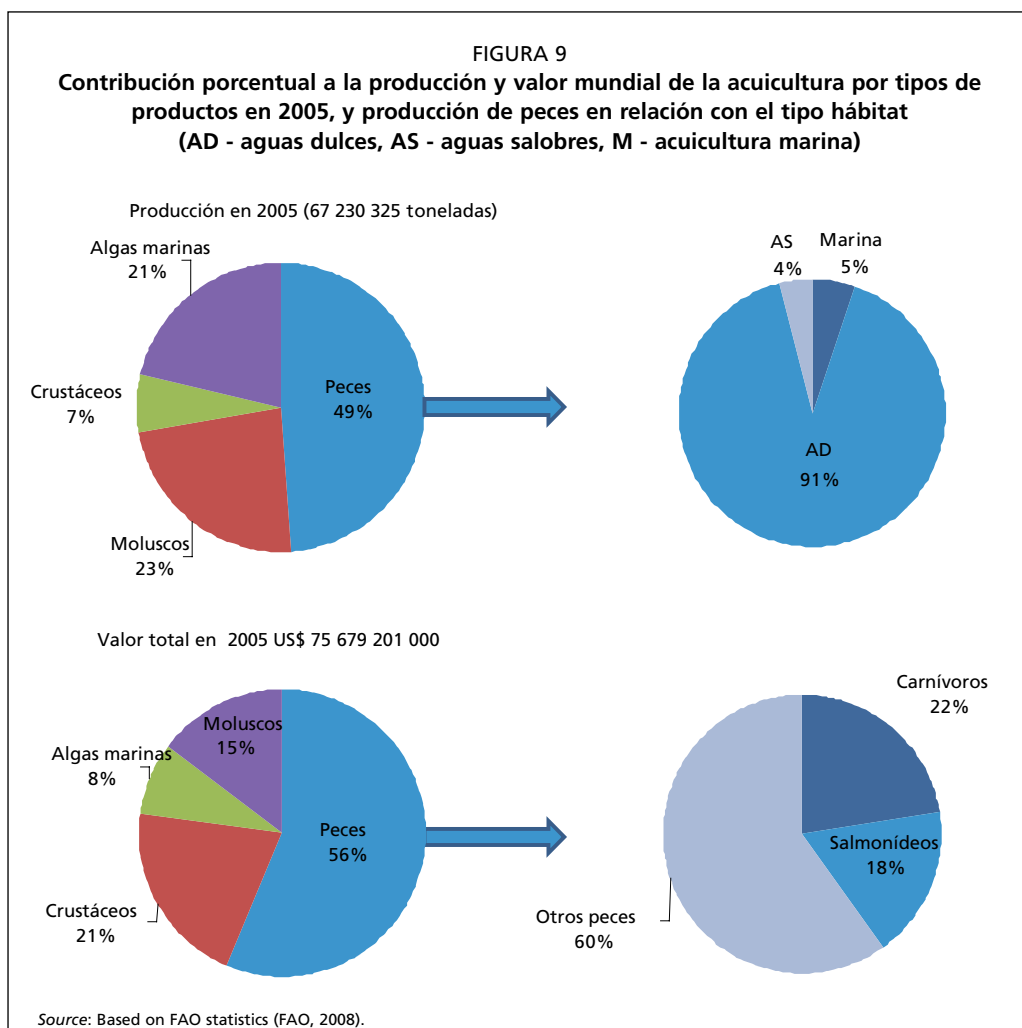
Una de las mayores repercusiones ocasionadas por el cambio climático es el recalentamiento mundial. El aumento de la temperatura acarrea cambios conexos en la hidrología e hidrografía de los cuerpos hídricos, multiplica la frecuencia de los episodios de floración de algas y mareas rojas, etc. Todos estos factores podrían tener repercusiones importantes en la acuicultura.

Para evaluar el efecto de este cambio en la acuicultura y considerar las medidas de adaptación que conviene adoptar, se ha creído apropiado tratar los diferentes sistemas de cultivo y referirlos por separado a los ambientes de aguas dulces y de aguas marinas.

Acuicultura continental

Acuicultura en estanques

La mayor parte de la acuicultura practicada en las regiones tropicales y subtropicales es el cultivo de peces (Figura 9). La forma predominante de acuicultura continental de peces es la que se desarrolla en estanques de tamaño que oscila entre unos pocos centenares de metros cuadrados y algunas hectáreas. Los estanques a menudo no son muy profundos; los estanques acuícolas más profundos en funcionamiento son los que se utilizan para el cultivo del bagre en Vietnam, con profundidad de 4 a 4,5 m. Los



principales factores que influyen en la temperatura del agua en los estanques son la radiación solar, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad, la turbidez del agua y la morfometría del estanque.

El aumento pronosticado de la temperatura del aire intensificará la vaporización y la cubierta nubosa (IPCC, 2007), y por consiguiente reducirá la radiación solar que llega a los estanques. En términos generales, el aumento mundial de la temperatura del aire podría por consiguiente no quedar reflejado directamente en un incremento concomitante de la productividad en los estanques piscícolas continentales. Esto indica que puede no ser necesario contemplar la sustitución de las especies cultivadas o cambiar las prácticas acuícolas habituales, en particular en las zonas tropicales y subtropicales.

No obstante, la situación podría ser ligeramente diferente para la acuicultura en estanques en las regiones templadas; a escala mundial, esta actividad es de dimensiones pequeñas y se limita principalmente a las especies de salmónidos y en menor medida a las carpas. Los salmones más frecuentemente cultivados en agua dulce son la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) y la trucha marina (*Salmo trutta*); para estas especies, el rango de temperaturas óptimas es muy estrecho y el límite superior de temperatura letal es relativamente bajo (Tabla 6). Estas especies también son cultivadas en tierras altas tropicales si bien en cantidades menores, pero representan un medio de vida para las comunidades agrícolas pobres. El aumento de la temperatura del aire podría reflejarse en un aumento de la temperatura en los estanques de acuicultura y causar repercusiones dañinas y, en casos extremos, mortalidad (para más detalles, véase la sección siguiente sobre el cultivo en jaulas). Por lo general, la piscicultura de truchas y salmónidos tiene lugar en estanques con alto recambio de agua o en estanques de flujo continuo en los que el agua fluye libremente 24 horas al día por la duración del ciclo de cultivo (para detalles, véase la Sección 5.3.2.4). Gracias al recambio de agua, las posibles repercusiones de las altas temperaturas pueden verse amortiguadas. Sin embargo, la disponibilidad de agua podría representar un problema para este tipo de explotación si se declarasen sequías debidas al cambio climático, tal como ya está sucediendo en algunas zonas andinas en América del Sur donde los glaciares están retrocediendo.

Acuicultura integrada

La acuicultura integrada es una práctica muy antigua que suele adoptar varias formas: el cultivo del arroz con la piscicultura y/o la integración de la acuicultura con la zootecnia. Se trata de formas de explotación tradicional en pequeña escala, a menudo realizadas por una sola unidad familiar.

La acuicultura integrada sigue siendo relativamente popular en China y se practica también en otros países asiáticos y en algunas regiones templadas de Europa oriental. El nivel de producción de pescado y otros productos derivados no se conoce con exactitud, pero baste decir que esta actividad representa un medio de sustento importante y a veces único para las comunidades rurales (Miao, en prensa).

En general, las especies de peces cultivadas se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica, y con frecuencia en este tipo de acuicultura se prescinde de cualquier aporte externo de piensos; la población se vale por sí misma extrayendo su alimento del fitoplancton, zooplancton y bentos. Por consiguiente, se trata de prácticas que funcionan esencialmente como sumideros de carbono. Feare (2006) sugirió que la acuicultura integrada con la cría de pollos o patos podría representar una canal para la difusión del virus de la gripe aviar, en especial si se considera que esta acuicultura encaja en los sectores 3 y 4⁵ de las líneas directrices FAO (2004) en materia de bioseguridad.

⁵ El sector 3, sistemas de producción comercial con niveles de bioseguridad bajos o mínimos; las aves y demás productos llegan por lo general vivos al mercado. Las aves se colocan en cobertizos abiertos y pueden pasar parte del día fuera del cobertizo. El sector 4, sistemas de producción de aldea o de traspatio con niveles de bioseguridad mínimos; las aves y demás productos son consumidos en la localidad.

Existe preocupación de que este tipo de prácticas podría poner en peligro la certificación y comercialización de los productos acuícolas, lo que supone la necesidad de adoptar nuevos enfoques precautorios.

La gripe aviar altamente patógena es causada sobre todo por la cepa H5N1 del virus de tipo A de la familia vírica Orthomyxoviridae. Es una enfermedad que se difunde fácilmente entre las aves domésticas y silvestres. Es preciso saber si los efectos del cambio climático repercutirán en la piscicultura integrada causando la propagación del virus, y si esto acarrearía peligros para la salud humana.

Resulta que podría ocurrir lo contrario. La potencialidad de repercusiones debidas al cambio climático radica en que el aumento de la temperatura del agua podría ocurrir, aunque con efectos mucho menores que en las zonas de clima templado. Sin embargo, se ha demostrado que la persistencia de los virus H5 y H7 es inversamente proporcional a la temperatura y salinidad del agua y que existen importantes efectos interactivos entre estos últimos parámetros (Brown *et al.*, 2006). Por tanto, la influencia general del cambio climático en la acuicultura integrada podría ser mínima, y con ello los temores de que la práctica de esta actividad tenga repercusiones en la difusión de los mencionados virus desaparecerían o se reducirían al mínimo. Sería de esperar que estas formas de cultivos integrados, entendidas como medida de adaptación que favorece la absorción de carbono (véase la Sección 6.1.2) se popularicen y se fomenten, y se desarrollen de manera de satisfacer las normas de seguridad alimentaria.

Cultivo en jaulas

A nivel mundial, la acuicultura en jaulas es cada vez más importante para el desarrollo de la acuicultura, y esta tendencia se mantendrá en el futuro próximo (Halwart, Soto y Arthur, 2007). Es posible que esta actividad esté impulsada por los siguientes factores:

- ante las limitaciones en cuanto a disponibilidad de tierras y de agua, la toma de conciencia de que es necesario utilizar las aguas continentales existentes para la producción de peces comestibles (De Silva y Phillips, 2007);
- la necesidad de satisfacer la creciente demanda de peces comestibles de calidad y mayor valor provenientes de ambientes marinos;
- se considera también que en aguas continentales el cultivo en jaulas representa un medio de subsistencia alternativo para las personas que han sido desplazadas tras la construcción de un dique de acopio de agua (Abery *et al.*, 2005), situación más frecuente en Asia que en otros lugares (Nguyen y De Silva, 2006).

La acuicultura en jaulas es una actividad con formas de operación e intensidad muy diversas, como también son variadas las especies que se cultivan. No obstante, una

RECUADRO 2

La piscicultura integrada es una actividad popular originaria de China que ha sido adoptada por muchos países de Asia como eficaz sistema de producción de alimentos en el medio rural. Esta práctica agrícola, que representa una forma eficiente y efectiva de reciclar los desechos biológicos, ha sido cuestionada respecto a la calidad de los alimentos producidos. En las fotos, explotaciones agrícolas integradas de peces, pollos y cerdos.



gran proporción del cultivo en jaulas se realiza en regiones tropicales, sobre todo en embalses y lagos; en cambio, la acuicultura en jaulas más tradicional y con finalidad menos comercial se practica en ríos. Casi siempre, la piscicultura en jaulas en zonas continentales produce peces de valor bajo a mediano (De Silva y Phillips, 2007). La proliferación no reglamentada del cultivo en jaulas en muchos cuerpos de agua en la región tropical ha conducido a episodios regulares de mortandad de peces y a la transmisión de enfermedades y por consiguiente a menores ganancias debido a la gran densidad de jaulas que se colocan en un cuerpo de agua sin considerar la capacidad de carga del ecosistema (Abery *et al.*, 2005).

Ficke, Myrick y Hansen (2007) han sugerido que el cambio climático podría agudizar los procesos de eutrofización y de estratificación en los sistemas lénticos. El aumento de la eutrofización podría ocasionar el agotamiento de oxígeno durante las horas del amanecer; y los cambios repentinos en los patrones eólicos y de pluviosidad determinar el afloramiento de las aguas profundas o del fondo, carentes de oxígeno, con perjuicios para las poblaciones cultivadas y las poblaciones de reclutamiento natural que residen en el cuerpo de agua. La desoxigenación resultante de las surgencias ha sido la causa de que en algunos cuerpos de agua la piscicultura en jaulas se vea hoy limitada a explotar un único cultivo por año y no dos como en el pasado.

Ante los cambios climáticos y para evitar los citados efectos, podría ser necesario que en los trópicos los cultivos en jaulas se planificasen mejor pues de lo contrario dejarían de ser factibles. Al diseñar las medidas de adaptación será preciso adoptar una perspectiva ecosistémica y restringir la intensidad del cultivo a la capacidad de carga del cuerpo de agua en cuestión. Además, en lo que respecta a la colocación de las jaulas, se deberán evitar las aguas excesivamente someras y aquellas en las que la circulación es escasa.

El cultivo fluvial en jaulas se practica tradicionalmente en la mayoría de las regiones tropicales de Asia. Pese a que se estima que su contribución a la producción de piscicultura es relativamente menor, este cultivo representa para muchas personas que viven en las cercanías de los ríos una modalidad de acuicultura de subsistencia. A menudo, en estas operaciones se cultivan peces de poco valor destinados a los mercados locales, y la mayor parte del producto comercializado depende del suministro de semillas silvestres (De Silva y Phillips, 2007). Aunque el grueso de las explotaciones no recurre ya a semillas capturadas en el medio silvestre (salvo en el caso señalado de las anguilas y de unas pocas especies carnívoras marinas), en algunas granjas piscícolas artesanales rurales pertenecientes a comunidades que viven en las cercanías de ríos se practica todavía una piscicultura de subsistencia en jaulas que en alguna medida usa semillas silvestres (De Silva y Phillips, 2007). El cambio climático podría afectar los patrones reproductivos de las poblaciones naturales y repercutir en la disponibilidad de este tipo de semillas; por otra parte, esta acuicultura de subsistencia podría también ser influida indirectamente por la escasa disponibilidad de agua en los ríos. Un método de adaptación para hacer frente a los cambios potenciales consistiría en mejorar las prácticas de explotación, por ejemplo mediante una alimentación más eficiente.

Maricultura

La maricultura en pozos excavados en la arena o los cultivos sobre el fondo, en balsas y en jaulas tienen lugar tanto en zonas costeras como en mar abierto en las tres regiones climáticas, es decir la zona tropical, subtropical y templada. En las zonas templadas la principal actividad acuícola es la maricultura de salmónidos en jaulas (Halwart, Soto y Arthur, 2007). La maricultura en las regiones tropicales y subtropicales produce variedades de peces de precio relativamente alto, como los meros (p. ej., *Epinephalus* spp., los pargos, *Sparus* spp., la cobia, *Rachycentron canadum*, etc.). Además hay cultivos marinos de moluscos como *Ruditapes* sp., *Mytilus* sp., y algas como *Gracilaria* sp. (véanse las Figuras 4, 5 y 6). Las algas marinas, ostras y almejas constituyen la mayor

proporción de la maricultura mundial. El cultivo de estos últimos grupos supone un consumo de energía mínimo; asimismo, las especies cultivadas son grandes absorbentes de carbono. Los mayores costos energéticos que derivan del cultivo de estos organismos son los relacionados con el transporte del producto hasta el consumidor. Estos cultivos son sumamente benignos en cuanto a emisiones de carbono, siempre que las instalaciones piscícolas estén adecuadamente localizadas, y las perturbaciones ambientales que producen sean exiguas o nulas. Las perturbaciones registradas han consistido sobre todo en modificaciones hidrográficas en la zona de cultivo y en la sedimentación de las materias fecales o pseudofecales en el fondo.

Los cambios climáticos y en particular el recalentamiento mundial podrían tener impactos directos e indirectos en la maricultura en regiones templadas. Las especies que se cultivan en éstas, principalmente los salmónidos (p. ej., *Salmo salar*) y el cultivo emergente del bacalao (*Gadus morhua*), tienen un margen de tolerancia térmica óptima relativamente estrecho (véase el Tabla 6). El sector salmonero ya ha conocido un aumento de la temperatura del agua en el pasado reciente, y se sabe que una temperatura superior a 17 °C podría ser perjudicial cuando la ingesta de pienso desciende y la eficacia de su utilización se reduce. Para desarrollar posibles medidas de adaptación, se ha comenzado a investigar la influencia de la temperatura en la eficacia de utilización del pienso y el aprovechamiento de proteínas y lípidos para estimular el crecimiento, en lugar de mantener las funciones del organismo a temperaturas elevadas, por ejemplo a 19 °C.

Algunos autores han mostrado que los piensos hipograsos producen mejores rendimientos a temperaturas elevadas (Bendiksen, Jobling y Arnesen, 2002); y ello indica que es posible perfeccionar las medidas de adaptación mediante la alimentación. Asimismo, existe el potencial de aumentar el cultivo de especies marinas tales como la cobia (*Rachycentron canadum*), una de las especies de crecimiento más rápido y de alta eficiencia de conversión alimentaria que requiere un aporte de proteínas en la dieta relativamente menor que otras especies marinas cultivadas. A diferencia de muchas de éstas, la cobia es muy fecunda y la producción de semilla en criadero se lleva a cabo ordinariamente con una tasa de supervivencia larval alta (Benetti *et al.*, 2008).

El aumento de las temperaturas en las regiones tropicales y subtropicales podría aumentar el crecimiento y por consiguiente mejorar la producción en general. Las temperaturas pronosticadas estarán comprendidas en el margen óptimo de tolerancia

RECUADRO 3

El cultivo en jaulas en aguas continentales puede adoptar muchas formas, y a menudo esta acuicultura tradicional, destinada mayormente a la subsistencia, se practica en los ríos tropicales; en cambio, las empresas acuícolas que se orientan más al comercio funcionan en lagos y embalses. Este tipo de acuicultura es frecuentemente intensivo y suele superar la capacidad de carga del cuerpo de agua; a lo largo de los años en algunos casos se han registrado con regularidad episodios de mortandad de peces. A menos que se tomen medidas de mitigación, esta situación podría verse exacerbada por el cambio climático. Las fotos muestran varias formas de acuicultura en jaulas en Asia tropical.



térmica de la mayoría de las especies que se cultivan en esas aguas (marinas, salobres y/o dulces), lo que significa que el recalentamiento mundial podría tener efectos positivos en el grueso de la producción de acuicultura siempre que los requisitos relacionados con los insumos de piensos, necesarios para compensar la mayor actividad metabólica, puedan satisfacerse y se puedan evitar otros factores perjudiciales asociados como las enfermedades.

En 2006, la producción pesquera en aguas marinas y salobres alcanzó 4 385 179 toneladas, de las cuales el 30 por ciento correspondió a salmónidos. La mayor parte de esta producción fue basada en alimento fabricado, y los principales ingredientes de éstos fueron la harina y el aceite de pescado. La gestión de los piensos en la salmonicultura es quizá la más eficiente de todo el sector de la acuicultura; sin embargo, el elevado grado de dependencia de la harina y aceite de pescado plantea un problema muy pertinente en la mayor parte de las hipótesis relativas al cambio climático.

Las repercusiones potenciales del cambio climático en la disponibilidad futura de estos productos para la fabricación de piensos acuícolas se aborda en detalle más adelante (véase la Sección 5.4). Los progresos que han tenido lugar en el sector de los piensos para salmones durante los últimos 20 años se han traducido en una reducción significativa de los factores de conversión y en el uso de una menor cantidad de harina de pescado, principalmente porque se ha recurrido a dietas hiperenergéticas que aprovechan la capacidad de ahorro de proteínas de los salmónidos. Otras actividades de piscicultura marina se han quedado generalmente rezagadas tanto respecto a estas tendencias de sustitución como en cuanto a la reducción de los índices de conversión alimentaria, en parte porque se trata de industrias jóvenes. El desafío a que se enfrenta el sector es asegurar que los piensos de alta densidad energética resulten igualmente efectivos en un medio en el cual las temperaturas han aumentado.

Se predice que la acidificación mundial aumentará debido al cambio climático (Hughes *et al.*, 2003; IPCC, 2007). Aparte de sus repercusiones en la formación de los corales, es posible que el aumento de la acidificación impida la calcificación de las conchas, en particular en los moluscos, y que este efecto, agudizado por el aumento de la temperatura del agua, afecte el cultivo de dichos organismos. El fenómeno ha recibido escasa atención y debería ser investigado con urgencia.

En la actualidad, el cultivo de moluscos representa cerca del 25 por ciento de toda la producción de acuicultura (aproximadamente 15 millones de toneladas en 2005), y es por eso que cualquier efecto negativo en la formación de las conchas podría tener graves consecuencias en la producción total de acuicultura. Prácticamente no existe información sobre los impactos potenciales del aumento de la temperatura del agua en la fisiología de los principales bivalvos cultivados. Sin embargo, si la productividad planctónica en las zonas de costa aumentase por el ascenso de las temperaturas, y siempre que se disponga de nutrientes, podrían observarse repercusiones positivas en el cultivo de los organismos filtradores. El aumento de las temperaturas asociado con la eutrofización y la proliferación de algas nocivas (Peperzak, 2003) podría causar eventos tóxicos más frecuentes, que a su vez podrían deteriorar la producción y aumentar los riesgos que para la salud humana representa el consumo de moluscos que provienen de las zonas afectadas. Esto requiere llevar a cabo investigaciones que suministren pronósticos más exactos acerca de los efectos netos esperados.

5.3.2.2 Infiltración de aguas salinas

Además del cultivo de camarones en zonas de estuario en Asia, América del Sur y el Caribe, se llevan a cabo en las regiones tropicales de Asia intensas actividades de acuicultura en los deltas de los principales ríos en el límite medio a superior de las áreas mareales. Destacan los cultivos relativamente recientes de bagre (*Pangasianodon hypophthalmus*) y de labeo (*Labeo rohita*) en el Mekong (Vietnam) (Nguyen y Hoang, 2007) y el Irawadi en Myanmar (Aye *et al.*, 2007), respectivamente.

Las primeras dos operaciones de acuicultura han proliferado durante la última década con una producción de 1,2 millones y 100 millones de toneladas, respectivamente. Han generado una gran cantidad de divisas y proporcionan medios de vida adicionales a las comunidades del medio rural. Las aguas salobres de la mayor parte de los deltas en las regiones tropicales de Asia están también entre las principales zonas de cultivo de camarón.

De gran importancia es que tanto el cultivo de peces como el de camarón son sectores en crecimiento y casi todo el producto es elaborado y se destina a la exportación. Se crean así oportunidades de empleo suplementarias con profundas consecuencias en la situación socioeconómica de la comunidad en general.

A causa de la subida del nivel del mar a lo largo de las próximas décadas la infiltración de aguas saladas río arriba aumentará afectando los cultivos dulceacuícolas. Debería contemplarse como medidas de adaptación trasladar las instalaciones de acuicultura a zonas superiores, desarrollar u optar por cepas más salino-tolerantes de las especies cultivadas o bien cultivar otras especies salino-tolerantes. Se trata de modificaciones costosas que repercutirán también en la situación socioeconómica de las comunidades involucradas. Cabe destacar que las medidas de adaptación podrán ocasionar el abandono de muchos estanques, y ello hará recordar lo que sucedió con las granjas camaroneras hace una década. Por el lado positivo para la acuicultura, con la penetración de aguas salinas que convierten las tierras en superficies inapropiadas para la agricultura, y en particular para el cultivo tradicional del arroz, se ganarían áreas adicionales para el cultivo del camarón. El camarón es un producto de valor mucho más alto que numerosos otros productos agrícolas y tiene gran potencial comercial pero su cría conlleva también mayores riesgos de ordenación. Si se opta por los cambios mencionados, habrá que modificar bastante las cadenas de suministro, y los países deberán incorporar estas necesidades en sus planes y pronósticos. Los fenómenos de subida del nivel del mar y de penetración salina también determinarán cambios ecológicos y de hábitat, incluidos los manglares, que funcionan como territorios de cría para muchas especies eurihalinas. Aunque en términos generales la mayor parte

RECUADRO 4

El cultivo del bagre y del labeo en los deltas de los ríos Mekong e Irawadi en Vietnam y Myanmar, respectivamente, son formas de acuicultura que han registrado las mayores tasas de crecimiento de todos los tiempos. Las regiones en las que se practica esta acuicultura pueden verse afectadas por la infiltración de aguas salinas debido a la subida pronosticada del nivel del mar. Estos son cultivos intensivos con gran densidad de población y altos niveles de alimentación de especies de agua dulce cuya tolerancia a la salinidad es relativamente baja. Para conseguir mitigar los efectos del cambio climático se haría por lo tanto necesario trasladar las instalaciones a lugares aguas arriba. Pero por otra parte, por el efecto mismo de las repercusiones climáticas se podría disponer de más espacio en los estanques para el cultivo de camarones, y ello permitiría entrelazar adecuadamente las cadenas de suministro. Las fotos muestran escenas de la acuicultura del bagre en el delta del Mekong.



de las explotaciones acuícolas dependen en la actualidad muy poco de los suministros naturales de semilla (con la excepción notable de la anguila de agua dulce, *Anguilla* spp.), será indispensable vigilar continuamente los cambios para diseñar medidas de adaptación adecuadas.

Se dispone de predicciones específicas relativas a la subida del nivel del mar en el delta del Mekong (Vietnam). Este delta es en verdad la cesta de alimentos de ese país y supone el 46 por ciento de la producción agrícola vietnamita y el 80 por ciento de las exportaciones de arroz (How, 2008). Se predice que el mar podría subir un metro e inundar una superficie de 15 000 a 20 000 km², ocasionando una pérdida equivalente al 76 por ciento de las tierras arables. El delta alberga ya una próspera acuicultura y la pérdida de tierras arables podría demandar la creación de medios de vida alternativos mediante la acuicultura.

5.3.2.3 Cambios en los patrones de los monzones y frecuencia de los fenómenos climáticos extremos

A lo largo de los pasados 50 años la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos como tifones, huracanes e inundaciones poco corrientes ha aumentado notablemente. El número de estos sucesos pasó de 13 entre 1950 y 1960 a 72 entre 1990 y 2000 (IPCC, 2007). Estos fenómenos se traducen en pérdidas económicas enormes. Las pérdidas económicas promedio para las mencionadas dos décadas se han estimado entre 4 000 y 38 000 millones de dólares EE.UU. (dólares fijos) y, para algunos años, en hasta 58 000 millones de dólares EE.UU. (IPCC, 2007). Se predice que los fenómenos meteorológicos extremos ocurrirán mayormente en las regiones tropicales y subtropicales. Para los pasados acontecimientos extremos los daños a la acuicultura no fueron cuantificados.

Los fenómenos de El Niño y La Niña también producen acontecimientos meteorológicos extremos en las regiones templadas. Por ejemplo, durante El Niño de 1994, se registraron 95 grandes tempestades que ocasionaron cuantiosos daños a la industria salmonera en el sur de Chile y la fuga de peces de las jaulas colocadas en el mar (Soto, Jara y Moreno, 2001). El Niño es conocido también como un fenómeno que provoca efectos ecológicos en los ecosistemas terrestres con efectos en la vegetación y fauna terrestre y marina (Jaksic, 2001). Como El Niño también acrecienta la gravedad de las tempestades invernales en América del Norte, el desarrollo de la acuicultura en mar abierto puede sufrir repercusiones adversas. Se predice que los efectos del cambio climático aumentarán probablemente en intensidad y que su frecuencia podría traducirse en impactos significativos en la acuicultura en mar abierto en las regiones templadas, que se sumarían a los efectos relacionados con los suministros de harina y aceite de pescado (véase la Sección 5.4.1).

Los fenómenos meteorológicos extremos pueden repercutir potencialmente en las actividades de acuicultura en las regiones tropicales y subtropicales de Asia y otros lugares. Las repercusiones potenciales podrían variar entre la destrucción física de las instalaciones hasta la pérdida de poblaciones en cultivo y la propagación de enfermedades. Las alteraciones climáticas recientes, las temperaturas excepcionalmente frías y las tempestades de nieve que ocurrieron en China meridional sirven como ejemplos para ilustrar el alcance de los impactos en la acuicultura de tales cambios (no se sugiere sin embargo que los fenómenos recientes estén vinculados a los cambios climáticos mundiales). Análogamente, Vietnam experimentó en 2007 la más grave inundación en 50 años, y los daños a la acuicultura no han sido evaluados (Nguyen, 2008).

De acuerdo con estimaciones preliminares, en China central se perdieron cerca de medio millón de toneladas de peces cultivados, en su mayor parte especies de aguas templadas y especies exóticas tales como la tilapia, de las cuales una importante proporción eran reproductores (W. Miao, comunicación personal). Quedan por

determinar las posibles perturbaciones ambientales que podrían causar los ejemplares fugados, en particular los pertenecientes a especies cultivadas exóticas.

La acuicultura asiática continental depende fuertemente de las especies exóticas (De Silva *et al.*, 2006). Si bien la fuga de individuos de las instalaciones acuícolas es un fenómeno casi inevitable en circunstancias normales y representa un problema persistente (Anónimo, 2007), la posibilidad de que un gran número de individuos cultivados penetre en las vías de agua debido a los efectos destructores de los eventos climáticos extremos es mucho mayor. Los grandes episodios de liberación involuntaria de individuos pueden causar fuertes perturbaciones ambientales y sus eventuales repercusiones negativas en la biodiversidad serían mucho más agudas. Además se podrían registrar pérdidas financieras directas y daño a la infraestructura de las instalaciones acuícolas.

Sin embargo, resulta casi imposible adoptar medidas de adaptación destinadas a evitar estos acontecimientos potenciales, salvo quizá reduciendo la dependencia de las especies exóticas para limitar los daños sólo a pérdidas financieras (pérdidas de poblaciones). Sin embargo, ésta no es una solución perfecta ya que los ejemplares fugados pertenecientes a especies nativas pueden afectar a la diversidad genética de las poblaciones silvestres, tal como se ha documentado en el caso del salmón del Atlántico (Thorstad *et al.*, 2008); los fenómenos meteorológicos extremos se suelen mencionar como la causa más frecuente de tales fugas. No obstante, el efecto de escapes de especies nativas cultivadas ha sido generalmente ignorado en todo el mundo.

El cambio climático puede en algunas regiones del planeta ser causa de clima severo (tempestades), alteraciones en la calidad del agua (debidas por ejemplo a la proliferación de algas) y quizá de mayores concentraciones de sustancias contaminantes y otros tipos de escorrentías dañinas provenientes de fuentes terrestres y producidas por las inundaciones en zonas costeras. Las mencionadas condiciones climáticas harán de la acuicultura marina un sector más vulnerable, en particular la acuicultura en jaulas que es la modalidad marina predominante para el cultivo de peces y algas en las bahías costeras de Asia. Esta acuicultura se está convirtiendo en el mayor productor de algas marinas cultivadas del mundo (véase la Figura 7).

Las instalaciones acuícolas ubicadas en tierra cerca de la costa son las más propensas a sufrir los impactos del clima severo, la erosión y las tempestades ciclónicas, con consecuencias como la destrucción de las estructuras de cultivo, escapes y la pérdida de los medios de vida de acuicultores. Entre las zonas más susceptibles están los deltas costeros de Asia, donde existen miles de granjas acuícolas en las que trabajan, principalmente en el cultivo de peces y camarones, otros tantos miles de personas.

Los ecosistemas de delta aguas abajo son igualmente frágiles debido a que sufren los cambios que tienen lugar aguas arriba, relacionados con la disponibilidad de agua y las descargas hídricas, las cuales ocasionan alteraciones en la calidad del agua y en los ecosistemas en las áreas de delta. Pocas son las medidas de adaptación posibles para hacer frente a estos impactos; pero éstas serán eventualmente similares a las que se han propuesto para la acuicultura continental.

La estación de huracanes en América Central ha afectado a la acuicultura costera rural; así ocurrió en Nicaragua, donde la camaronicultura era una actividad floreciente entre comienzos del decenio de 1990 y 1998 cuando el huracán *Mitch* devastó un gran número de granjas y muchos acuicultores no estuvieron en condiciones de reemplazar la producción perdida. Otras tempestades muy destructoras han sido los huracanes *Dennis* y *Emily* en Jamaica, *Stan* en El Salvador y Guatemala y, más recientemente, *Félix*, que acabó con muchas zonas rurales de Nicaragua, algunas con empresas de acuicultura incipientes. En general, las medidas de adaptación más pertinentes consisten en evaluar los riesgos climáticos en las zonas donde se encuentran las granjas acuícolas; el tema se trata bajo el título «Zonificación y seguimiento en la acuicultura», Sección 7.1.3.

5.3.2.4 Estrés hídrico

De acuerdo con las proyecciones, el estrés hídrico resultante del cambio climático podría tener repercusiones considerables en la acuicultura de regiones tropicales, en especial en Asia. Se cree que los efectos de estrés se traducirán en una disponibilidad hídrica reducida en los principales ríos de Asia central, meridional, oriental y sudoriental, y de África (IPCC, 2007), que son zonas donde se desarrollan actividades acuícolas importantes. Por ejemplo, los deltas de algunos de los principales ríos, tales como el Mekong, el Meghna-Brahamaputra y el Irawadi, son regiones en las que se lleva a cabo una intensa actividad de acuicultura que contribuye a los ingresos de exportación y a los medios de sustento de miles de personas. Aparte de este hecho, el uso prudente de este recurso primordial se ha convertido en un asunto de gran interés, ya que del aprovechamiento racional del agua depende la sostenibilidad de la acuicultura.

La cantidad de agua que se utiliza para la producción de alimentos varía enormemente de un sector a otro. Zimmer y Renault (2003) han indicado que es preciso diferenciar entre los sectores de la producción de alimentos, por ejemplo en cuanto a:

- principales productos primarios (p. ej., cereales, frutas, etc.);
- principales productos elaborados (p. ej., productos alimenticios derivados de los productos primarios);
- principales productos de transformación (p. ej., productos animales, ya que éstos se producen a partir de productos vegetales);
- principales productos que se producen con poco consumo de agua o sin agua (alimentos marinos).

En la Tabla 7 se comparan las necesidades hídricas específicas por unidad de producción de productos seleccionados del sector de la zootecnia. Sin embargo, aparte de la acuicultura en estanques, otras formas de acuicultura como el cultivo en jaulas son consumidoras directas casi nulas de agua salvo en lo que respecta a los piensos. En términos generales, la reducción del uso de agua en la acuicultura se podría conseguir: a) seleccionando ingredientes de pienso que puedan ser producidos con poca agua; b) mejorando la producción interna de piensos destinados al sistema acuicultura mediante tecnologías relacionadas con el perifiton; y c) integrando el aprovechamiento del agua con la agricultura (Verdegem, Bosma y Verreth, 2006). Algunas de las medidas mencionadas ya se aplican en la acuicultura asiática de peces que se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica, por ejemplo en los sistemas de policultivo de carpas recurriendo a fuentes de alimentos disponibles naturalmente mediante una producción apropiada de perifiton (Wahab *et al.*, 1999; Van Dam *et al.*, 2002).

Es necesario considerar la reducción de la disponibilidad de agua que se pronostica en los grandes sistemas fluviales deltaicos de Asia –que albergan importantes actividades de acuicultura– en conjunción con el fenómeno de infiltración de aguas salinas resultante de la subida del nivel del mar (Hughes *et al.*, 2003) y los cambios esperados en los patrones de precipitación monzónica (Goswami *et al.*, 2006).

A lo largo de los grandes sistemas fluviales del Asia tropical la extracción y descarga de aguas es muy abundante y se debe principalmente a la acuicultura intensiva del camarón y el bagre. Un modelo global en el que se incorporasen las anteriores variables relacionadas con las regiones deltaicas del Mekong y el Meghna-

TABLA 7
Demanda hídrica específica (m³/t) para diferentes productos alimenticios animales* y comparación con las necesidades relativas a la acuicultura

Producto	Demanda hídrica
Carne de vacuno, carne de carnero, carne caprina	13 500
Carne de cerdo	4 600
Aves	4 100
Leche	790
Mantequilla + grasas	18 000
Carpa común (cultivo intensivo/estanques) ^a	21 000
Tilapia (cultivo extensivo/estanques) ^a	11 500
Pienso en gránulos utilizado en estanques ^b	30 100

a- Muir, 1995; b- Verdegem, Bosma and Verreth, 2006.

Fuente: *datos tomados de Zimmer y Renault, 2003.

Brahmaputra en Bangladesh y el Irawadi en Myanmar, entre otras, permitirá determinar con precisión:

- el grado de penetración de las aguas marinas en el río y hacia los humedales contiguos;
- las actividades agrícolas que podrían ser perdidas a consecuencia de la penetración de las aguas marinas;
- los cambios brutos en el hábitat (véase también la Sección 5.3.2.1). Las repercusiones potenciales en las migraciones de desove y por lo tanto los cambios en la disponibilidad de semillas para cultivos de subsistencia en jaula;
- las repercusiones socioeconómicas generales de los acontecimientos resultantes.

La información disponible permitirá tomar medidas de adaptación y responder por ejemplo a la pregunta siguiente: ¿Podría compensarse la pérdida de actividad agrícola en estas zonas deltaicas con la provisión de medios de vida alternativos derivados de la acuicultura o de la maricultura? Esta posibilidad podría equivaler a un potencial impacto no perjudicial del cambio climático porque se habría encontrado para las comunidades rurales una forma de subsistencia más lucrativa. Si se adoptase esta medida de adaptación sería urgente crear capacidades en materia de acuicultura en el seno de las comunidades agrícolas, incluido quizá un dispositivo de apoyo financiero para la construcción de infraestructuras (p. ej., estanques, viveros y viviendas) y proporcionar apoyo gubernamental adecuado para facilitar el tránsito de la agricultura a la acuicultura.

En la salmonicultura continental en regiones templadas y en tierras altas y en las zonas de bajas temperaturas de los trópicos y sub-trópicos, se tiende a adoptar cada vez más los estanques de flujo continuo, que son sistemas en los cuales la demanda de agua es sumamente elevada. Es muy probable que este tipo de acuicultura sufra los efectos del estrés hídrico, lo que hace necesario modificar las prácticas de cultivo para que pueda sobrevivir. En las zonas aguas arriba donde la cubierta de nieves se ha derretido podría contemplarse la posibilidad de crear nuevas áreas para la acuicultura de especies de aguas frías y templadas.

Actualmente se fomenta la acuicultura no consuntiva del agua, como el cultivo en jaulas (aparte de los insumos que se introducen durante el proceso de producción de piensos) y el aprovechamiento de los pequeños cuerpos de aguas lénticas para la pesquería basada en el cultivo (De Silva, 2003; De Silva, Amarasinghe y Nguyen, 2006), para lo cual se recurre a piensos producidos de forma natural dentro del sistema hídrico.

La pesquería basada en el cultivo es una actividad comunitaria que utiliza un recurso hídrico de propiedad común, que requiere menos capital y que es reconocida por funcionar eficazmente en cuerpos hídricos no perennes en los que el agua se retiene por períodos de seis a ocho meses. Se predice que en algunas regiones, en particular en Asia y en África, las temporadas de sequía se prolongarán debido al cambio climático (Goswami *et al.*, 2006; IPCC, 2007) por lo que la capacidad de retención hídrica en los cuerpos no perennes será menor. Como consecuencia, la mayor parte de los cuerpos de agua serán relativamente inadecuados para la acuicultura ya que se necesita un período mínimo de retención de seis meses para que la mayor parte de los peces alcance un tamaño comercial.

Para atenuar las principales limitaciones o las repercusiones potenciales del estrés hídrico es preciso realizar esfuerzos específicos destinados a conservar el agua en la acuicultura en zonas terrestres, que es aún la forma predominante de la acuicultura continental. En este sentido, la tecnología de recirculación se considera una solución plausible. Sin embargo, los desembolsos de capital y los costos de mantenimiento son actualmente bastante elevados, como también son considerables los niveles de pericia que exige el manejo rutinario (De Ionno *et al.*, 2006).

Para que la producción de especies cultivadas en sistemas de recirculación sea rentable, es normal que su precio de mercado alcance valores relativamente altos. Esto

implica cultivar especies que se alimentan en los eslabones superiores de la cadena trófica y plantea problemas relacionados con los piensos a los cuales es preciso hacer frente. Uno de los objetivos de las medidas de adaptación destinadas a minimizar los impactos del cambio climático es que deben articularse en torno a los procedimientos de ahorro de energía. Los costos energéticos de operación de los sistemas de recirculación son elevados (De Ionno *et al.*, 2006), y, aun si son remunerativas, estas operaciones contribuirán más que cualquier otra actividad de acuicultura tradicional a las emisiones de gases de efecto invernadero, primera causa del cambio climático.

Durante las dos últimas décadas se ha defendido muchas veces el desarrollo de la maricultura en mar abierto como un procedimiento factible para aumentar la producción de peces porque ocasiona muy pocas perturbaciones ambientales inmediatas. No obstante, este desarrollo ha sido impedido por problemas técnicos y logísticos y los gastos de capital necesarios (Grøttum y Beveridge, 2008). Obviamente tales empresas se enfrentarán también al problema común de la acuicultura: el suministro de harina y aceite de pescado en suficiente cantidad para la fabricación de alimento.

5.4 Repercusiones indirectas del cambio climático en la acuicultura

Las repercusiones indirectas del cambio climático en un fenómeno o en un sector productivo pueden ser sutiles, complejas y difíciles de desentrañar, pero los desafíos que plantean las medidas de adaptación que es necesario diseñar para combatir las o superarlas pueden ser formidables.

Como las pesquerías representan una de las principales fuentes de insumos para la acuicultura al suministrar en particular piensos y en menor medida semilla, las alteraciones resultantes del cambio climático mundial que se registren en ellas se harán sentir en los sistemas de acuicultura. Especial importancia tendrá la designación de las diferentes áreas aptas para el cultivo las especies de acuicultura, pero también serán factores pertinentes la disponibilidad y los precios de los recursos, por ejemplo la proteína de pescado que se usa para la fabricación de piensos. Handisyde *et al.* (2006) examinaron dos repercusiones indirectas del cambio climático en la acuicultura en relación con las posibles fluctuaciones de los precios de los productos de la pesca de captura y las repercusiones de la disponibilidad de harina y aceite de pescado. El informe discute los cambios en la producción de estos dos productos y la necesidad de modificar el uso que a ambos se da en la acuicultura, pero sin dar mayores detalles.

También es oportuno señalar que puede crearse una situación imprevista en lo que respecta a la producción de alimentos acuícolas debido a que algunas materias primas vegetales serán desviadas en cantidades crecientes hacia la producción de biocombustibles. Por efecto de la competencia, la disponibilidad de los alimentos acuícolas podría verse limitada y los costos de los ingredientes podrían aumentar. Puesto que la producción de biocombustibles y el desvío de materias primas que tiene como propósito la fabricación de biocombustibles están aún en una etapa de transición, y las partes interesadas expresan sobre la materia puntos de vista opuestos, es prematuro tratar este tema con detalle y mucho menos predecir sus futuros impactos en la disponibilidad de alimentos acuícolas.

5.4.1 Suministros de harina y aceite de pescado

El tipo de repercusión indirecta del cambio climático más evidente y más frecuentemente discutido en el sector acuícola se relaciona con los suministros de harina y aceite de pescado y su uso simultáneo en la acuicultura. Tacon, Hasan y Subasinghe (2006) estimaron que en 2003 el sector consumió 2,94 millones de toneladas de harina de pescado en todo el mundo (53,2 por ciento de la producción mundial de harina de pescado), y que esas cifras equivalían al consumo de 14,95 a 18,69 millones de toneladas de pez forraje/morralla/pez de bajo valor, especialmente pelágicos pequeños. En todo el mundo se han realizado investigaciones para combatir este problema incipiente. Se

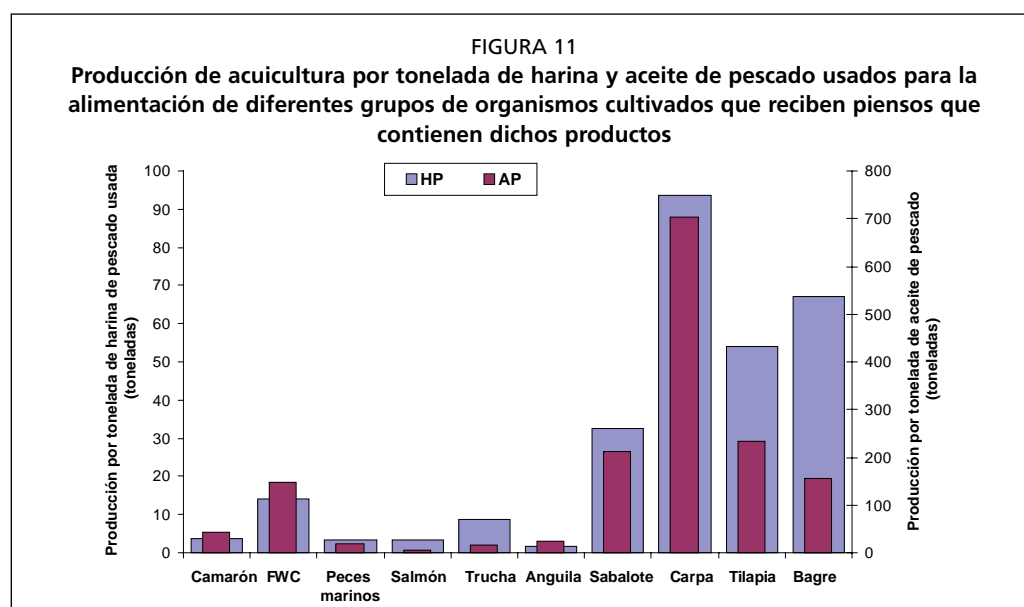
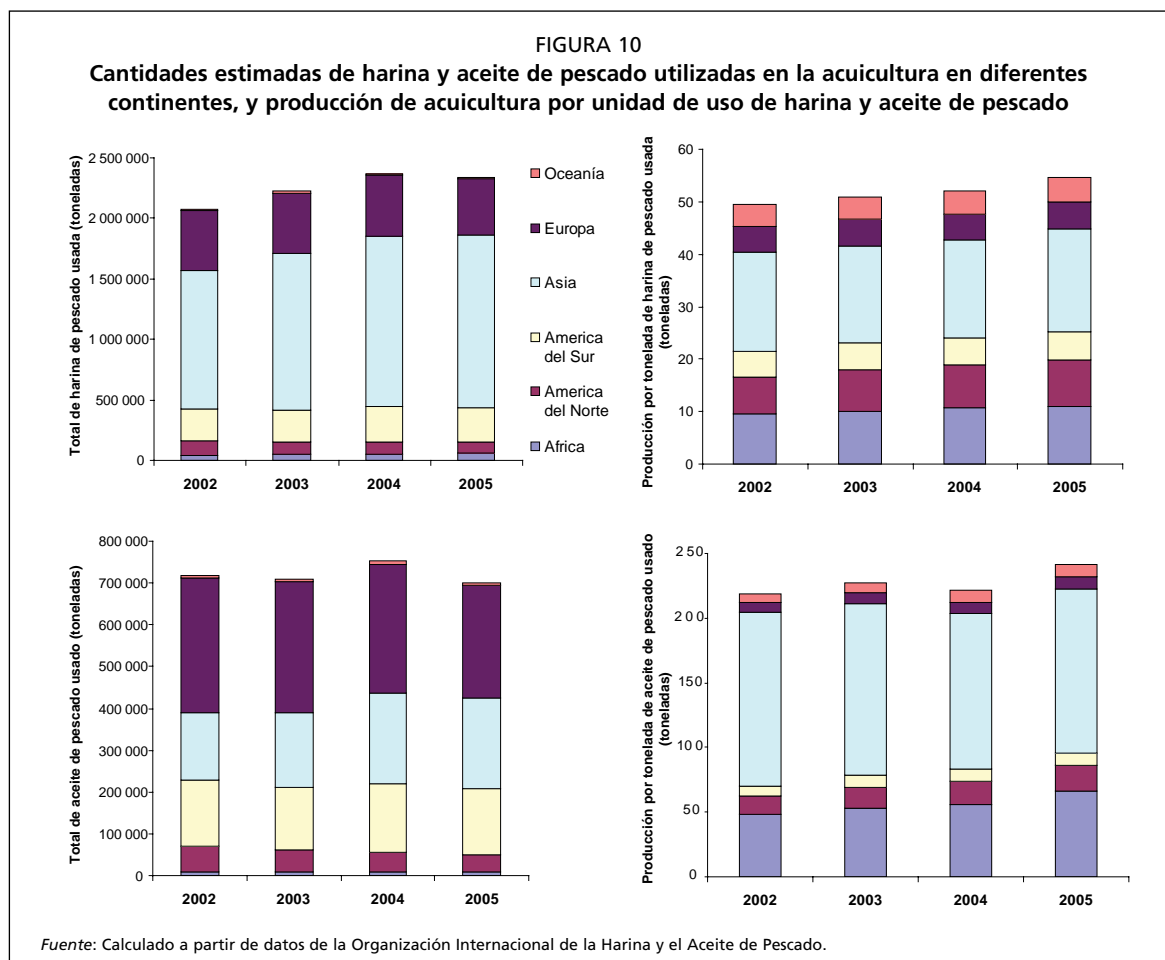
han llevado a cabo estudios prácticamente en todas las especies cultivadas para ensayar el posible reemplazo de la harina de pescado con otras fuentes de proteínas más baratas fácilmente disponibles, en especial subproductos agrícolas. La literatura sobre el tema es voluminosa y exhaustiva. Desafortunadamente, las conclusiones han conducido a escasas soluciones prácticas, con la excepción notable del empleo de la soja y la harina de trigo en cantidades relativamente elevadas en los alimentos para peces. Los problemas encontrados en el campo de la transferencia de las soluciones teóricas a la práctica, así como otros temas relacionados, han sido ya estudiados en detalle (p. ej. por Tacon, Hasan y Subasinghe, 2006; Hasan *et al.*, 2007; De Silva, Sim y Turchini, 2008).

La producción industrial de harina y aceite de pescado se basa normalmente en unas pocas poblaciones de pequeños pelágicos poco longevas de crecimiento rápido que se encuentran en zonas subtropicales y templadas. Las principales poblaciones que se utilizan en la industria de la transformación son la anchoveta peruana, el capelán, el lanzón y las sardinas.

Se ha predicho que la productividad biológica en el Atlántico septentrional disminuirá en el 50 por ciento y que, a nivel mundial, la productividad del océano bajará un 20 por ciento (Schmittner, 2005). Además de la pérdida de productividad general y el consiguiente impacto en la pesca de captura y por ende en la materia prima disponible para transformación, se pronostican otros efectos del cambio climático en la pesca. Es posible que los cambios anunciados en la circulación oceánica determinen una mayor frecuencia de fenómenos del tipo El Niño. Éstos influirán a su vez, como ya ha ocurrido en el pasado, en las poblaciones de los pequeños pelágicos (p. ej., la anchoveta peruana, *Engraulis ringens*). El impacto de El Niño en los desembarques de sardina peruana y anchoa –y por tanto en los suministros mundiales de harina y aceite de pescado– ha sido bien documentado (Pike y Barlow, 2002). Análogamente, los cambios que ocurran en el índice invernal de la oscilación atlántica (Schmittner, 2003), que se traducen en temperaturas invernales más altas, podrían influir en el reclutamiento de los lanzones (*Ammodytes* spp.). Estas variaciones en la productividad de las pesquerías que abastecen a la industria de transformación limitarán la disponibilidad de materia prima transformable y en particular las actividades de las principales pesquerías de las que proviene la producción de harina y aceite de pescado.

Teniendo presente que la acuicultura no es una actividad uniformemente practicada a través del mundo y que predomina en las regiones tropicales y subtropicales, conviene considerar cuáles serán las prácticas acuícolas más afectadas y de qué forma. De la Figura 10 se desprende que si bien el uso de la harina de pescado es notablemente mayor en Asia, en Europa predomina el uso del aceite de pescado. Lo que es más importante es que la producción por unidad de harina y aceite de pescado es bastante más alta en los países en los que la acuicultura se basa sobre todo en las especies de peces omnívoros que reciben piensos procedentes del exterior, los cuales contienen mucho menos harina y muy poco aceite de pescado. Este último hecho es evidente cuando se consideran los grupos de especies cultivadas en relación con los beneficios por unidad de uso de harina y aceite de pescado en el pienso (Figura 11). Este análisis se basa en la cantidad de harina y aceite de pescado que se usa en los piensos para cada grupo de peces y crustáceos, el índice promedio de conversión alimentaria para cada grupo y la cantidad de estos piensos usada para cada grupo. El análisis presentado indica que a raíz de los posibles cambios climáticos y las consiguientes repercusiones adversas en las poblaciones de peces silvestres con que se abastecen las industrias de transformación, el camino por seguir consiste en aumentar de manera concertada y desarrollar aún más, en los trópicos y sub-trópicos, la acuicultura de peces omnívoros y peces que se alimentan por filtración.

Esta sugerencia ha sido formulada múltiples veces por muchos autores (Naylor *et al.*, 1998; 2000, entre otros), y los procedimientos de adaptación exigirán cambios profundos en la demanda de consumidores y mercados. Al atraer la atención del público



sobre este asunto, el mismo se ha convertido en un tema de debate ético. Los cambios en la opinión pública podrían darse con el tiempo, si se tiene presente que muchos grupos abogan ya, desde un punto de vista puramente ético, por que los recursos primarios usados en la industria de transformación sean canalizados hacia los pobres como fuente alimentaria directa (Aldhous, 2004; Allsopp, Johnston y Santillo, 2008). En efecto, a medida que se dispone de información más precisa acerca del encauzamiento de los recursos pesqueros hacia finalidades distintas de las de la producción de alimentos para

el ser humano (De Silva y Turchini, 2008), es muy probable que la demanda del público se oriente lentamente a la acuicultura de peces omnívoros y peces que se alimentan por filtración.

5.4.2 *Otros ingredientes de los piensos usados en la acuicultura*

Aunque se ha subrayado que lo importante es cómo reducir el uso de harina y aceite de pescado en los piensos para organismos acuáticos cultivados, a lo largo de los últimos años han ido surgiendo otros problemas. Por ejemplo, las harinas de soja y de trigo se usan a menudo como ingredientes de los piensos para organismos acuáticos cultivados, y el salvado de arroz se usa en la acuicultura tropical semi-intensiva. Ante la necesidad universal de encontrar alternativas adecuadas a los combustibles fósiles, la producción de biocombustibles es una de las principales opciones. El uso de algunos de los ingredientes mencionados para producir biocombustibles ha dado origen a diversos desafíos económicos y sociales que han producido un efecto dominó (Naylor *et al.*, 2000); la repercusión definitiva de esta situación en el sector de la acuicultura es aún difícil si no imposible de predecir.

Además de lo señalado, el aumento del precio de los alimentos y la disminución de los beneficios para los acuicultores (Anónimo, 2008a) –un proceso que ha sido llamado «el tsunami silencioso» (Anónimo, 2008b)–, son dos asuntos que preocupan al sector en la medida en que la disponibilidad de los ingredientes para los piensos y su encarecimiento puedan repercutir negativamente en el costo de los piensos. En la acuicultura, independientemente del producto y del lugar en donde se practique el cultivo, los precios al productor no han aumentado significativamente a lo largo de los años; de hecho, para algunos productos como el camarón (Kongkeo, en prensa) y el salmón (Grøttum y Beveridge, 2008), los precios han bajado en términos reales.

El margen de beneficio en la acuicultura es sumamente estrecho, y los aumentos de los costos podrían repercutir en los beneficios a tal punto que algunas actividades acuícolas serían inviables. Un factor positivo importante es que en la acuicultura, para la fabricación de los ingredientes de los piensos se usan casi siempre subproductos agrícolas. Por ejemplo, la harina de soja utilizada en los alimentos acuícolas es un subproducto de la extracción del aceite de soja. De forma similar, para la confección de piensos destinados a la acuicultura semi-intensiva de las carpas se usa una gran cantidad de tortas oleaginosas de mostaza (*Brassica* spp.) y de cacahuete, que son subproductos de la extracción del aceite (De Silva y Hasan, 2007).

Las repercusiones del cambio climático en la agricultura terrestre se están comenzando a cuantificar, y se sabe por lo general que en las zonas tropicales esta agricultura sufrirá más daño que en las zonas templadas (McMichael, 2001). La mayoría de los subproductos agrícolas usados en los alimentos acuícolas provienen de los trópicos. Sin embargo, no se dispone fácilmente de estudios sobre las fluctuaciones de los precios de los subproductos. Urge evaluar los cambios en la disponibilidad, accesibilidad y estructura de los precios de los subproductos agrícolas usados en los alimentos acuícolas y diseñar estrategias de adaptación para garantizar la continuidad de los suministros de dichos alimentos a precios razonables en el futuro próximo, así como la viabilidad de la acuicultura.

5.4.3 *Suministros de morralla, de pez de poco valor y de pez forraje*

Existen otras posibles repercusiones indirectas del cambio climático en determinadas prácticas de acuicultura que en un contexto socioeconómico adquieren gran importancia para algunos países en desarrollo. También en este caso se trata de repercusiones relacionadas con los suministros para alimentos acuícolas y sus ingredientes, en particular la morralla, el pez de poco valor y el pez forraje (véase el Recuadro 5).

Se ha estimado que en la región de Asia y el Pacífico el sector de la acuicultura utiliza en la actualidad entre 1 603 000 y 2 770 000 toneladas de morralla o de pez de poco

valor como fuente directa de piensos. Las predicciones altas y bajas para el año 2010 son de 2 166 280 a 3 862 490 toneladas de uno u otro producto como insumos directos para los piensos (De Silva, Sim y Turchini, 2008). Sugiyama, Staples y Funge-Smith (2004) estimaron que en China y en Filipinas se usan, respectivamente, el 72,3 por ciento de 5 millones de toneladas (3 615 000 toneladas) y 144 638 toneladas de morralla o de pez de poco valor como piensos para alimentar a las poblaciones cultivadas. Edwards, Lee y Allan (2004) estiman que en la acuicultura vietnamita se usan 323 440 toneladas de estos productos, en su mayor parte para la fabricación de piensos en la granja destinados a la alimentación de los bagres pangásidos que se cultivan en el delta del Mekong. En la Tabla 8 se resumen las estimaciones acerca del uso de la morralla o del pez de poco valor en la acuicultura de Asia y el Pacífico; es evidente que las cantidades son relativamente grandes. Es importante notar que la mayor proporción de

TABLA 8

Uso total de morralla/pez de poco valor como fuente directa de piensos en la acuicultura de Asia y el Pacífico

Actividad	Países/regiones	Calidad*	Cantidad por 1 000 toneladas		
			Actual (rango)	2010a	2010b
Peces marinos	Asia sudoriental	A, B	1 603–2 770	913	1 663
Atún de aleta azul del sur	Australia meridional	B	50–60	45	50
Peces de agua dulce	Asia	A,B	332.44	na (332.44)	na (332.44)
Engorde de cangrejos	Asia sudoriental	B	480–700	600	700
Cultivo de Moluscos	Asia	C	0.035–0.049	0.050	0.055
Total			2 166 280–3 862 490	1 890 490	2 745 495

Calidad A– inferior, no apropiada para el consumo humano; calidad B– puede ser apropiada para el consumo humano; calidad C– buena, apropiada para el consumo humano. Las predicciones para 2010 (predicción a = baja y b = alta) se basan en el aumento de los índices de producción y en cambios asociados a la gestión de los piensos, según los datos ofrecidos en las Tablas anteriores. Para los cangrejos y moluscos, las predicciones se basan en un aumento porcentual de la producción a partir de los datos presentes. n.d. = no disponible.

Fuente: De Silva *et al.*, 2008.

RECUADRO 5

La morralla, peces de poco valor y peces forraje, provienen principalmente de las pequeñas pesquerías costeras artesanales y son parte importante de las materias primas para la acuicultura tropical de Asia. Se usan directamente en la alimentación de las poblaciones cultivadas, como en el caso de los peces marinos, secas o en polvo como producto de industrias domésticas, o procesadas en las instalaciones acuícolas para la elaboración de piensos en combinación con otros ingredientes. Estas pesquerías en pequeña escala podrían ser afectadas por los cambios climáticos porque la productividad del océano se reducirá (Schmittner, 2005), incluida la productividad del océano Índico (Gianni, Saravanan y Chang, 2003), y consiguientemente alterar el suministro de un importante ingrediente del pienso para la acuicultura en pequeña escala. Las imágenes muestran el ingrediente (pescado seco), la molienda y el pienso en gránulos resultante, que se prepara según las especificaciones requeridas en la granja y se vierte en los estanques para la alimentación de bagres (Vietnam).



estos productos proviene de las pesquerías costeras artesanales de la región, las cuales proveen medios de subsistencia a miles de pescadores.

Aparte de la pronosticada reducción general de la productividad oceánica, se ha anticipado que el océano Índico se está calentando más rápidamente y que el cambio climático dará lugar a perturbaciones considerables en este océano y en zonas terrestres, en especial en cuanto a productividad y pautas de circulación (Gianni, Saravanan y Chang, 2003). La situación podría extremarse debido a los cambios que afectan a los patrones de pluviosidad monzónica (Goswami *et al.*, 2006) y que influyen en la productividad pesquera en las costas, además de otras repercusiones generales relacionadas con los suministros de morralla y peces de poco valor.

Aunque ya se está abordando cómo reducir la dependencia de estos productos en la creciente maricultura asiática, las repercusiones que tendrán lugar aproximadamente durante los diez años venideros en este sector acuícola no pueden ser ignoradas y deben ser enfrentadas con urgencia. El problema es tanto más agudo si se considera que los pescadores de subsistencia y otros pescadores pequeños que no pueden desplazar sus pesquerías y carecen de alternativas son a menudo los que más dependen de un tipo específico de pesquerías, y quienes sufrirán mayormente las alteraciones y la mayor frecuencia de los cambios a que el IPCC (2007) atribuye un índice de ocurrencia de mediana fiabilidad.

5.4.4 Repercusiones en las enfermedades

Mucho se ha debatido sobre el cambio climático y los riesgos asociados para la salud humana (véase p. ej. Epstein *et al.*, 1998; McMichael, 2003; Epstein, 2005). La opinión generalizada es que la incidencia de las enfermedades diarreicas transmitidas por vectores terrestres irá en aumento. Las tendencias potenciales del cambio climático en los organismos acuáticos y a su vez en las pesquerías y la acuicultura han sido menos documentadas, y los estudios se han concentrado sobre todo en el descoloramiento de los corales y otros cambios conexos. Se ha informado de un aumento de la incidencia de brotes de enfermedades en corales y mamíferos marinos, junto a la incidencia de nuevas enfermedades (Harvell *et al.*, 1999). El descoloramiento de corales se vinculó a las altas temperaturas causadas por el fenómeno de El Niño en 1997 y 1998; se ha sugerido que tanto los acontecimientos climáticos como la actividad antropogénica pueden haber acelerado el desplazamiento mundial de las especies, y que así se han reunido patógenos y poblaciones antes no expuestas a agentes infecciosos (Harvell *et al.*, 1999; Hughes *et al.*, 2003).

Daszak, Cunningham y Hyatt (2000) han indicado que la intensificación agrícola y las translocaciones asociadas pueden exacerbar las enfermedades infecciosas emergentes en animales silvestres que viven en libertad; y que, a raíz de los cambios climáticos –en particular el recalentamiento mundial en algunas zonas áridas del globo–, éstas podrían repercutir en la biodiversidad. Sin embargo, en otros lugares como Europa se predice que esta tendencia disminuirá (IPCC, 2007).

Se ha hecho notar que no se dispone de conocimientos acerca de los parásitos de los animales acuáticos distintos de los parásitos deletéreos causantes de las enfermedades que afectan al ser humano. A raíz de los efectos asociados con el cambio climático que repercuten en los patrones de circulación, y atendiendo a las predicciones deducidas de los modelos de circulación general, se ha tratado de entender los cambios que afectan a las poblaciones de parásitos en las regiones templadas o boreales de América del Norte oriental (Marcogliese, 2001). La conclusión general arrojada por las simulaciones ha sido que el cambio climático puede influir en la selección de diferentes rasgos del ciclo biológico y que puede afectar la transmisión de los parásitos y potencialmente a su virulencia. Resulta difícil predecir las consecuencias de tales cambios en la acuicultura en sí, pero el estudio indica que el sector acuícola debe ser consciente de las amenazas nuevas y potenciales representadas por el parasitismo.

Durante las últimas dos décadas el ritmo de la eutrofización en algunos océanos y la proliferación de algas nocivas asociadas con este fenómeno han aumentado debido a influencias antropogénicas (Smayda, 1990). Se ha señalado que el ritmo de eutrofización y de proliferación de algas nocivas (FAN)⁶ iría en aumento a causa de las perturbaciones resultantes del cambio climático, en especial en algunos océanos como el Atlántico septentrional y el mar del Norte (Peperzak, 2003; Edwards *et al.*, 2006), por ejemplo a lo largo de la costa noruega y en otros lugares, pero no de forma homogénea. Las algas tóxicas repercutirán en la vida marina y en la salud humana por conducto del consumo por el hombre de moluscos filtradores, un fenómeno que corrientemente se designa como envenenamiento por mariscos. Además, los FANs también podrían ocasionar efectos dañinos en los cultivos en jaulas, como en el caso de la salmonicultura. Es preciso adoptar medidas de adaptación para hacer un seguimiento regular de las instalaciones acuícolas en las zonas potencialmente vulnerables a la eutrofización y FANs.

Es posible que el cambio climático potencie tanto las especies altamente competitivas, tales como la ostra del Pacífico (*Crassostrea gigas*), como la difusión por nuevas zonas de las especies patógenas asociadas (Diederich *et al.*, 2005). Un hecho relacionado y comparable es que se tienen pruebas de la difusión de dos parásitos protozoarios (*Perkinsus marinus* y *Haplosporidium nelsoni*) en dirección norte desde el Golfo de México hacia la bahía de Delaware (Hofmann *et al.*, 2001) y que esto ha causado una mortalidad masiva en la ostra del Atlántico (*Crassostrea virginica*). Se ha indicado que la difusión patógena se ha debido a la subida de las temperaturas invernales en las que, bajo condiciones normales, los patógenos se mantenían inactivos cuando las temperaturas eran inferiores a 3 °C.

Todas las mencionadas especies hospederas son especies de cultivo. Con el pronosticado aumento de las temperaturas en dirección hacia el polo determinadas por el cambio climático se podría registrar la emergencia de patógenos que se mantenían bajo control cuando las temperaturas invernales eran más bajas. Por lo tanto, pueden ocurrir repercusiones que afectarán en particular a organismos cultivados tales como los moluscos. Otro ejemplo reciente es el brote de *Vibrio parahaemolyticus* en ostras en Alaska y en mariscos en el sur de Chile (Karunasagar, I., 2008; comunicación personal). En este último país, el primer brote importante ocurrió a comienzos de 2004 y se ha mantenido durante los meses de verano (Paris-Mancilla, 2005) debido a que aparentemente las temperaturas del agua de mar han aumentado durante esa estación. Tampoco es posible ignorar el efecto de otros factores tales como el aumento de los nutrientes en las zonas costeras (Hernández *et al.*, 2005). Las medidas de adaptación son, en este caso, principalmente de dos tipos: por una parte, evitar que los organismos comestibles (en especial los bivalvos) queden expuestos a altas temperaturas durante el transporte o el almacenamiento (dado que la temperatura óptima para la multiplicación del patógeno es de 37 °C; H. Lupin, comunicación personal), y cocinar correctamente los mariscos y demás alimentos marinos. Para evitar estos peligros, el consumo de pescado crudo o ceviche⁷ ha sido prohibido en Chile, sobre todo durante el verano.

No es difícil predecir en la acuicultura las repercusiones generales del calentamiento del agua en la difusión de enfermedades tales como las enfermedades bacterianas porque, en la mayoría de los casos, su incidencia y persistencia se relacionan con el estrés sufrido por los peces. El aumento de las temperaturas del agua generalmente ocasiona estrés en los peces y facilita las manifestaciones patológicas (Snieszko, 1974). La literatura abunda en ejemplos al respecto. Últimamente se ha mostrado el posible efecto de la acidificación en la respuesta inmune de los mejillones, por ejemplo en el caso del mejillón común, *Mytilus edulis*, una popular especie de acuicultura (Bibby *et al.*, 2008). Se ha indicado que las alteraciones obedecen a cambios en la condición

⁶ FANs – Floraciones algales nocivas

⁷ Ceviche, cebiche o seviche es el nombre común del plato de pescado crudo en América Latina y el Caribe.

y funciones de los hemocitos, causados a su vez por el efecto de la disolución del carbonato cálcico de la concha.

Es plausible que en la acuicultura de agua dulce pueda aumentar la absorción de sustancias tóxicas y metales pesados en los moluscos cultivados filtrantes, debido a que la subida de la temperatura acelera el ritmo metabólico en estos organismos (Ficke, Myrick y Hansen, 2007), y que esto pueda plantear problemas relacionados con la seguridad alimentaria y la certificación del producto. Pocas son las opciones de adaptación a que se podría recurrir para obviar estas dificultades; quizá lo más apropiado como primera medida sería controlar regularmente la calidad del agua y el producto cultivado para determinar los riesgos para la salud humana.

Claramente, la difusión de enfermedades es una de las amenazas más temibles, si no la mayor, para la acuicultura. Entre los ejemplos de catástrofes debidas a enfermedades en la industria acuícola cabe citar la difusión de la mancha blanca en la camaricultura del Ecuador y otros países de América Latina (Morales y Morales, 2006), y más recientemente la anemia infecciosa del salmón (ISA, por su sigla en inglés), que está perjudicando gravemente la industria salmonera chilena a tal punto que sus operaciones podrían contraerse durante los próximos dos a cinco años o un período incluso mayor. Dado que la difusión de las plagas y enfermedades se considera una de las grandes amenazas bajo las distintas hipótesis del cambio climático, las medidas de bioseguridad que es preciso adoptar en el sector de la acuicultura deben ocupar un lugar prioritario en los planes de adaptación.

5.4.5 Repercusiones en la biodiversidad

Uno de los temas especiales que fue objeto de gran atención desde las etapas iniciales de las deliberaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2002) ha sido el impacto en la biodiversidad. En general, se predice que éste ocurrirá en los hábitats terrestres y en menor medida en los acuáticos, aparte de las que derivan del blanqueamiento de los corales y de la consiguiente pérdida de hábitats coralinos, los cuales están entre los de mayor biodiversidad de la Tierra. Sin embargo, hasta la fecha solo la extinción de una especie se ha vinculado indiscutiblemente al cambio climático: la del sapo dorado (*Bufo periglenes*), que ha desaparecido de Costa Rica (Crump, 1998). Las predicciones de pérdidas totales de biodiversidad atribuibles al cambio climático son asombrosas; el estudio de Thomas *et al.* (2004) por ejemplo menciona que, extrapolando datos, bajo las concentraciones actuales de gases de invernadero, al menos una de cada cinco especies de la Tierra estaría destinada a extinguirse.

Entre las principales características del sector de la acuicultura en todos los regímenes climáticos, continentes y regiones están la fuerte dependencia de las especies exóticas (Gajardo y Laikre, 2003; De Silva *et al.*, 2005; Turchini y De Silva, 2008), la translocación asociada de nuevas especies más allá de su ámbito de distribución geográfica normal y la constante transferencia de reservas de semilla entre países y cuencas hidrográficas. Se ha informado hasta ahora de algunas introducciones de parásitos internos vinculados a translocaciones realizadas con propósitos de producción. Si bien no ha sido posible contrastar las repercusiones devastadoras derivadas de un caso concreto de translocación relacionado con la introducción de una plaga fúngica y la consiguiente diseminación del cangrejo europeo de agua dulce nativo (Edgerton *et al.*, 2004), porque no se disponía de indicios explícitos acerca de las especies exóticas *per se* y su efecto en la biodiversidad, ello no es motivo para dejar de efectuar controles (De Silva *et al.*, 2004).

Las repercusiones en la biodiversidad causadas por especies exóticas han sido en su mayor parte producto de la competencia por el alimento y el espacio con las especies nativas (p. ej. Moyle y Leidy, 1992; Soto *et al.*, 2006), la alteración de hábitats (p. ej. Collares-Pereira y Cowx, 2004) y la transmisión de organismos patógenos (Dobson y May, 1986) y han tenido origen en interacciones como la hibridación y la introgresión

(Dowling y Childs, 1992; Leary, Allendorf y Forbes, 1993; Rhymer y Simberloff, 1996; Araguas *et al.*, 2004) y otros efectos genéticos indirectos (Waples, 1991). Gienapp *et al.* (2008) abordaron la posible relación entre cambio climático y evolución, concluyendo que:

- muchas alteraciones que se ven como formas de adaptación al cambio climático podrían ser respuestas de adaptación plástica al ambiente y no genuinas adaptaciones micro-evolutivas;
- no existen pruebas fehacientes que indiquen que la adaptación evolutiva al continuo proceso de recalentamiento climático pueda jugar un papel importante.

Se plantea entonces la pregunta si, a raíz de los cambios climáticos mundiales, la dependencia continua, si no en aumento, de las especies exóticas en los futuros avances en el sector acuícola y las reservas de semilla asociadas podría tener repercusiones adversas en la transmisión de enfermedades y en la biodiversidad. Haciendo un balance de las pruebas, se puede afirmar que el cambio climático no amplificará las repercusiones en la biodiversidad de eventuales efectos ejercidos por la acuicultura *per se*. Sin embargo, teniendo en cuenta los cambios en los regímenes de temperatura y otros fenómenos similares, en particular en la región templada, es mayor la posibilidad de que ocurran enfermedades que afecten a moluscos filtradores y a peces. Además, en todo intento de nuevas introducciones con propósitos acuícolas será necesario tomar en consideración los mencionados factores a la hora de hacer una evaluación inicial de riesgos encaminada a adoptar decisiones.

En el ámbito del desarrollo de la acuicultura mundial hay tres grupos principales de especies que han sido translocadas por todas las regiones geográficas y han llegado a jugar un papel importante en la producción: entre éstas están los salmónidos en las aguas templadas frescas y las tilapias en las aguas templadas tropicales. Ambas suponen en la actualidad una producción de más de un millón de toneladas que se realiza en zonas fuera del ámbito de distribución nativo de dichas especies. A éstas sigue muy de cerca el camarón patiblanco *Penaeus vannamei*. Las tres están entre las especies exóticas más importantes y podrían sufrir las repercusiones del cambio climático. En las regiones templadas, el recalentamiento estrechará el ámbito de distribución de los salmones cultivados, mientras que el efecto opuesto podrá darse para la tilapia y el camarón. En este último caso, la distribución se podría extender hacia gran parte de las zonas subtropicales, donde en el presente el período de cultivo se limita a un único ciclo de crecimiento al año y el grueso de los reproductores es mantenido en condiciones de invernadero.

Las repercusiones del cambio climático en el descoloramiento de los corales y la pérdida de biodiversidad conexas son fenómenos abundantemente documentados y adecuadamente entendidos. El decaimiento de los arrecifes debido al descoloramiento, a la debilitación de los esqueletos y al escaso proceso de acumulación de corales alcanzará, según se calcula, el 60 por ciento para el año 2030 (Hughes *et al.*, 2003). De acuerdo con estos autores, los factores de destrucción de los arrecifes no son los mismos que los que la impulsaban en épocas anteriores, y se deben sobre todo a elementos vinculados al cambio climático. No es evidente en este momento cuál pueda ser la pertinencia de la pérdida de los arrecifes de coral y la biodiversidad para la acuicultura. De todas maneras, una de las causas principales del deterioro de los arrecifes –es decir, los métodos de pesca destructivos (McManus, Reyes y Nanola, 1997; Mous *et al.*, 2000) cuyo propósito es abastecer peces vivos a los restaurantes de lujo (Pawiro, 2005; Scales, Balmford y Manica, 2007)– está menguando. Este declive se debe a la sustitución de esos peces con suministros provenientes de la acuicultura, en especial los meros. Es posible que el pescado de los arrecifes de coral termine siendo reemplazado por completo por el producto que procede de la acuicultura; y con ello se habría eliminado una de las causas de la destrucción de los corales y se contribuiría a la conservación de estos hábitats críticos y asimismo a la protección de la biodiversidad.

Los episodios de fuga de individuos contenidos en las instalaciones acuícolas hacia el medio silvestre pueden aumentar debido a los fenómenos meteorológicos extremos tales como ciclones tropicales o marejadas ciclónicas. Se ha discutido acerca de las repercusiones causadas por las especies exóticas en la biodiversidad local, pero no de las repercusiones de la acuicultura en las especies nativas. A menudo, la estructura genética de las poblaciones acuícolas ha sufrido alteraciones debidas a la cría selectiva, a las prácticas de selección, a la deriva y adaptación genética de individuos que viven en cautividad al ambiente y en algunos casos a la endogamia severa (véase p. ej. Eknath y Doyle, 1990).

Las alteraciones de la estructura genética de las poblaciones podrían repercutir potencialmente en el patrimonio génico de las contrapartes silvestres de las especies cultivadas a través de interacciones genéticas entre individuos que han escapado e individuos silvestres. Sin embargo, como lo ha expresado Rungruangsak-Torrissen (2002), los individuos fugados sanos no genéticamente manipulados no deberían representar una amenaza para las poblaciones de salmón silvestre. Esta opinión es diametralmente opuesta a la de otros autores (p. ej. Jonsson y Jonsson, 2006) y denota la complejidad del problema.

La falta de acuerdo, tanto en el campo científico como en otros dominios, no es razón para manifestar una actitud complaciente. Un problema similar se está abordando con algunas especies acuícolas nuevas tales como el bacalao (Jørstad *et al.*, 2008). Thorstad *et al.* (2008) han analizado tanto los efectos causados por los individuos fugados nativos de salmón del Atlántico (p. ej., en Noruega) como los del salmón exótico (p. ej., en Chile) y no dudan en afirmar que cualquiera que sea la especie cultivada o sus antecedentes genéticos, las medidas preventivas y de mitigación para controlar las fugas deben adoptarse en todos los casos.

Además de causar alteraciones genéticas, se piensa que los individuos fugados del medio acuícola son responsables del aumento de las infecciones parasitarias de las poblaciones silvestres, por ejemplo, en el salmón en aguas costeras del Canadá (Krkošek *et al.*, 2007; Rosenberg, 2008), entre otros. Las fugas masivas de las instalaciones acuícolas causadas por los fenómenos meteorológicos extremos –muy distintas de las fugas de unos pocos individuos que tienen lugar normalmente a lo largo del tiempo– podrían influir en la estructura genética de las poblaciones nativas y perjudicarlas a largo plazo. Quizá sea necesario al diseñar las instalaciones para zonas vulnerables a los fenómenos climáticos inusuales tomar medidas especiales para contener los escapes masivos.

5.5 Repercusiones sociales del cambio climático en la acuicultura

Las repercusiones sociales del cambio climático en la pesca de captura, comparadas con las repercusiones sociales en la acuicultura, han sido objeto de mucha mayor atención (véase p. ej., Allison *et al.*, 2005). Este análisis se concentra en las comunidades pesqueras vulnerables pobres. En esencia, las repercusiones sociales potenciales sobre las pesquerías son múltiples y estriban en:

- la disminución de las ganancias de los pescadores debido a la reducción de las capturas y abundancia de las poblaciones (Luam Kong, 2002; Mahon, 2002);
- los cambios en las rutas migratorias y en la biogeografía de las poblaciones y su efecto en el esfuerzo pesquero; sirva como ejemplo la dilatación de los tiempos de viaje hacia los bancos pesqueros (Dalton, 2001; Mahon, 2002);
- los cambios en la tecnología de cosecha y en los costos de elaboración resultantes de la necesidad de capturar especies nuevas (Broad, Pfaff y Glantz, 1999);
- los daños al capital físico ocasionados por los fenómenos meteorológicos severos (Jallow, Barrow y Leatherman, 1996);
- las repercusiones en las cadenas y sistemas de transporte y mercadeo (Catto, 2004);

- la reducción del capital humano derivada de los efectos de los fenómenos meteorológicos severos, el aumento de las mareas rojas y el concomitante envenenamiento de los crustáceos (Patz, 2000).

Algunos de los factores mencionados, por ejemplo los daños al capital físico o las repercusiones en los sistemas y canales de transporte y de mercadeo, tendrán con toda probabilidad algunos efectos en la acuicultura. Si se considera que la mayor parte de las empresas acuícolas en zonas tropicales y subtropicales son empresas pequeñas, a menudo de propiedad o gestionadas por los mismos acuicultores, pero agrupadas (véase el Recuadro 6) en zonas favorables para la acuicultura, los perjuicios que resultan de los fenómenos meteorológicos extremos repercutirán en los medios de vida propios de esas agrupaciones y afectarán potencialmente a muchos hogares pobres.

Estas comunidades agrícolas están entre las más vulnerables del sector de la acuicultura y las posibilidades de reducir su fragilidad son relativamente limitadas. Como medida de adaptación para permitir a este conjunto recuperar sus medios de vida será necesario implantar un plan de seguros colectivo, lo cual requerirá cambios en las políticas y apoyo por parte del gobierno.

Por el impulso que recibe de precios altos de los productos básicos y mayores márgenes de beneficios, el cultivo de peces es el subsector de la acuicultura que registra hoy en las zonas tropicales el más rápido índice de crecimiento; las técnicas de reproducción mejoradas fortalecen asimismo la expansión de las actividades de este subsector. En los trópicos, estas actividades se desarrollan casi siempre en bahías costeras encerradas y consisten en agrupaciones de pequeñas propiedades potencialmente vulnerables a los acontecimientos climáticos tales como tempestades marinas y marejadas. Estas comunidades acuícolas son muy vulnerables a los fenómenos meteorológicos adversos. Cabe tener presente que, al menos en Asia, este sector recurre sobre todo a los servicios de pescadores en pequeña escala que suministran morralla o pez de bajo valor para la alimentación de las existencias cultivadas. Una situación de mayor vulnerabilidad de estos proveedores podría repercutir en las empresas comunitarias que cultivan peces, que frecuentemente son negocios familiares. Ciertamente, ambos grupos serán muy vulnerables a los efectos del cambio climático, y las alteraciones potenciales serán padecidas mayormente por los pescadores artesanales, quienes estarán obligados a encontrar medios de vida alternativos, mientras que los cultivadores de peces podrán optar por alimentar a sus poblaciones con piensos comerciales, si esto les resultase económicamente factible.

RECUADRO 6

En la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales de Asia, donde se desarrolla el grueso de las actividades de acuicultura costera y continental, las pequeñas explotaciones individuales suelen estar agrupadas en las zonas más propicias para la acuicultura. Los fenómenos meteorológicos inusuales originados por el cambio climático podrían tener consecuencias adversas en estas agrupaciones y en los medios de vida de sus componentes. En las fotos, actividades de gran densidad de piscicultura marina en jaulas en la bahía de Xin Cuin, condado de Ling Shui (China); cultivo de algas marinas en pequeña escala en Sulawesi (Indonesia), y piscicultura continental en jaulas en el embalse de Cirata (Indonesia).



Se ha señalado más arriba que la subida del nivel del mar, el estrés hídrico y los fenómenos climáticos extremos podrían influir mucho en las regiones de delta, y no se descarta que las actividades agrícolas terrestres deban ser abandonadas y sustituidas por la acuicultura como medio de vida alternativo. Estos cambios entrañan grandes trastornos sociales en lo que respecta a los estilos de vida que harán necesario instaurar medidas de adaptación cuidadosamente planeadas. Inicialmente será necesario proporcionar asistencia en materia de creación de capacidades para que el cambio en las formas de subsistencia sea eficaz. Existen ejemplos que ilustran cómo se pasa de la agricultura a la acuicultura para asegurar los medios de vida; al respecto cabe mencionar las experiencias de comunidades que han debido desplazarse a causa de la construcción de diques de contención. Se ha informado de algunos casos en que los titulares han mejorado su situación socioeconómica tras la adopción de la acuicultura (Pradhan, 1987; Abery *et al.*, 2005; Wagle *et al.*, 2007).

Podrían registrarse repercusiones sociales negativas indirectas en el vecino sector de la elaboración acuícola que produce productos de valor relativamente bajo y que accede fácilmente a las instalaciones de cultivo. Sin embargo, con la subida del nivel del mar y la consiguiente infiltración de aguas salinas (véase la Sección 5.3.2.2) podría ser necesario trasladar las instalaciones de cultivo a zonas aguas arriba, y quizá las plantas elaboradoras se verían motivadas para seguir el ejemplo. Esto se traduciría en pérdidas de oportunidades de empleo para algunas comunidades y en ganancias para otras y crearía, al menos temporalmente, problemas sociales y una retirada de capitales. Otro factor indirecto es que algunos de los mecanismos de adaptación que han sido desarrollados a nivel mundial para combatir las emisiones de carbono y por lo tanto el cambio climático podrían ocasionar una vulnerabilidad mayor en el sector de la acuicultura.

Uno de los grandes cambios sociales e industriales que se registra en el mundo entero es la importancia cada vez mayor que se da a la producción de biocombustibles y la presión de grupos que abogan por que las materias primas que se usan para la producción de piensos acuícolas –harina y aceite de pescado– se destinen directamente a la alimentación humana (Naylor *et al.*, 1998; 2000; Aldhous, 2004). Estas tendencias afectarán a la acuicultura ya que los ingredientes esenciales de los piensos serán siempre más escasos y caros; y por consiguiente el cultivo de peces carnívoros y camarones se volverá una empresa casi prohibitiva.

Algunos grupos de presión sostienen que en un mundo que está tomando conciencia de los procesos que determinan las emisiones de carbono, incluidas las que derivan de la producción de alimentos, la acuicultura constituye una actividad que carece de sostenibilidad ecológica. Hace dos décadas, los consumidores no ponían mucha atención a la calidad, el eco-etiquetado y la trazabilidad, pero ahora estos asuntos han adquirido trascendencia en la comercialización, sobre todo en el mundo desarrollado.

Se ha hecho notar que algunos productos cultivados son energéticamente costosos, pero obtienen un precio al consumo alto que los sitúa en la escala superior de los mercados. Es posible que en el futuro próximo los consumidores exijan un etiquetado que declare las emisiones de carbono producidas, y que el eco-etiquetado conduzca gradualmente al descenso de la demanda de productos energéticamente costosos como el camarón y el salmón. Este escenario no es irreal y podrían observarse repercusiones socioeconómicas significativas en los países productores y en el extremo alto del mercado de la producción y elaboración de productos de la acuicultura, que se dirige a un público selecto. Por el lado positivo, en cambio, podría darse un regreso, en particular en el caso del camarón, a especies nativas tales como el camarón tigre (*Penaeus monodon*) que se cultivarían con arreglo prácticas de ordenación mejoradas con menor costo de energía (véase la Tabla 11).

El aumento de la incidencia en la acuicultura de enfermedades debidas al cambio climático tendrá grandes impactos sociales en los pequeños productores y en otros

trabajadores del sector. En la actualidad esta situación se observa en industria del cultivo del salmón en Chile, que ha sido muy afectada por el virus de la anemia infecciosa del salmón (ISA)⁸, aunque la enfermedad no ha sido relacionada hasta ahora con el cambio climático. A causa de la enfermedad, el desempleo ha aumentado drásticamente en todos los niveles de esta industria, desde los trabajadores hasta el sector de los servicios, con fuertes repercusiones en la economía local.

6. REPERCUSIONES POTENCIALES DE LA ACUICULTURA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

A escala mundial, y en comparación con la zootecnia, la acuicultura ha constituido solo en época relativamente reciente una fuente importante de alimentos para la cesta alimentaria humana. A lo largo de las últimas dos décadas, el sector ha crecido mucho. Esto lo ha convertido en la industria de producción primaria de más rápida expansión (FAO, 2007). Su florecimiento tuvo lugar en un período en que el mundo se volvía más consciente y manifestaba preocupaciones acerca de la sostenibilidad, uso de los recursos primarios y problemas asociados relativos a la degradación ambiental. La sostenibilidad, la biodiversidad y la conservación pasaron a formar parte integrante de todos los esfuerzos de desarrollo tras la publicación del Informe Brundtland *Nuestro futuro común*, en 1987 (PNUMA, 1987), y las iniciativas mundiales de seguimiento tales como el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) (1994).

En este escenario mundial de aumentar la conciencia y vigilancia pública, el sector ha sido puesto en tela de juicio desde muchos frentes. Principalmente se ha cuestionado el uso de la harina y aceite de pescado obtenidos mediante la transformación de materias primas supuestamente apropiadas para el consumo humano directo (Naylor *et al.*, 1998; 2000; Aldhous, 2004). Otro tema litigioso ha sido la tala de manglares que se practicó durante la época del auge del cultivo del camarón (Primavera, 19989; 2005). Es cierto que en el pasado la tala de manglares –hoy abandonada– representaba un grave problema relacionado con la camaronicultura. De hecho, se ha estimado que las pérdidas de manglares debidas al cultivo de camarón son inferiores al 5 por ciento y que las mayores pérdidas son las causadas por la presión ejercida por la población y por la tala destinada a abrir espacios para la agricultura, la construcción de urbanizaciones, la explotación maderera y la producción de combustible (GPA, 2008).

Un argumento opuesto es que las contribuciones positivas de la acuicultura pueden no haber sido cuantificadas en su totalidad porque no se han tomado en consideración los beneficios no relacionados con la cesta alimentaria humana. Se ha ignorado las influencias positivas derivadas de la acuicultura respecto a asuntos como el cambio climático, mientras que es preciso que la sociedad en su conjunto admita que toda producción de alimentos conlleva algunos costos ambientales que se deben comparar de manera ecuánime (Bartley *et al.*, 2007). Por lo tanto, a continuación se intentará describir los aportes positivos de la acuicultura al problema mundial del cambio climático.

6.1 Comparación de las emisiones de carbono y la contribución a los gases de efecto invernadero derivadas de la zootecnia y la acuicultura

Las emisiones de carbono de origen antropogénico, es decir los gases de efecto invernadero, cualquiera sea su forma, son una de las causas del cambio climático (Brook, Sowers y Orchard, 1996; Flattery, 2005; Friedlingstein y Solomon, 2005; IPCC, 2007), y todas las medidas de mitigación giran en torno a la reducción de tales emisiones. Resulta entonces pertinente considerar hasta qué punto los distintos sectores de la producción de alimentos de origen animal contribuyen a las emisiones de carbono a fin de evaluar el aporte de la acuicultura a esta causa primaria. Se admite que no es

⁸ www.salmonchile.cl/frontend/seccion.asp?contid=1109&secid=4&subsecid=61&pag=1

fácil y que es incluso imposible realizar estimaciones precisas o siquiera aproximadas de las emisiones totales producidas por cada uno de los sectores. Sin embargo, aun aproximadas, las estimaciones reflejan el papel indirecto jugado por la acuicultura a este respecto.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ha reconocido 14 fuentes principales de emisiones de metano en los Estados Unidos de América, y clasificó la fermentación entérica y el manejo del estiércol producidos por el sector de la zootecnia como la tercera y quinta mayores fuentes de emisión, respectivamente. Las emisiones procedentes de estas dos fuentes de producción de alimentos de origen animal fueron de 117,9 y 114,8, y 31,2 y 39,8 TgCO₂ Equivalentes en los años 1990 y 2002, respectivamente⁹. Por efecto de la fermentación microbiana (o fermentación entérica), el proceso de ruminación del ganado domesticado –es decir de los rumiantes (vacunos, búfalos, ovejas, cabras, etc.)– genera grandes cantidades de metano en el curso normal de la digestión de alimento. Este metano es descargado hacia la atmósfera. Asimismo, los desechos sólidos (estiércol) producidos por los animales necesitan ser manejados, y este proceso da origen a grandes cantidades de metano. Los niveles de metano atmosférico han pasado de 715 ppb¹⁰ a 1 775 ppb en el período desde la revolución preindustrial a la actualidad. Tendencias comparables se han registrado en los núcleos de hielo en Groenlandia (Brook, Sowers y Orchardo, 1996). Se ha indicado que el ganado mundial es responsable del 18 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero, cantidad superior a las emisiones producidas por todos los tipos de transporte sumados, y estas emisiones provienen en su mayoría de los 1 500 millones de cabezas de ganado (Lean, 2006). En conjunto, se estima que el sector ganadero produce el 37 por ciento de todas las emisiones de metano inducidas por el hombre. Se calcula que el potencial de calentamiento global del metano es 23 veces superior al del dióxido de carbono.

Los organismos acuáticos cultivados no emiten metano y por lo tanto no contribuyen directamente a los factores que causan estas emisiones. Es sorprendente, y desafortunado, que este hecho no haya sido tomado en cuenta, en especial por aquellos que aseveran que la acuicultura es una actividad contaminante y no sostenible (véase p. ej. Allsopp, Johnston y Santillo, 2008).

La demanda mundial de alimentos de origen animal ha aumentado impulsada por el aumento de los ingresos y la urbanización, en particular en el mundo en desarrollo. Se estima que en el mundo en desarrollo el consumo cárnico per cápita pasó de 15 kg en 1982 a 28 kg en 2002, esperándose que alcance 37 kg en 2030 (FAO, 2003). En los países en desarrollo, el aumento de la demanda de productos alimentarios de origen animal se ha traducido en un ritmo de producción acelerado, y en 1995 su producción superaba la del mundo desarrollado (Gerber *et al.*, 2007). Cualquier análisis debe considerar las necesidades alimentarias humanas y la contribución porcentual de cada uno de los sectores productores de alimentos a las emisiones de gases de efecto invernadero.

6.1.1 Captura de carbono

Una de las causas principales, si no la causa principal del cambio climático es, independientemente de la fuente o fuentes de emisión, la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Brook, Sowers y Orchardo, 1996; Flattery, 2005; Friedlingstein y Solomon, 2005; Kerr, 2006; IPCC, 2007). La absorción de carbono es el proceso mediante el cual las actividades agrícolas y forestales retiran el dióxido de carbono atmosférico. Se considera que la forestación, la reforestación y la conservación forestal son prácticas que favorecen la absorción y/o la conservación del carbono y que

⁹ www.epa.gov/methane/sources.html#anthropogenic

¹⁰ ppb= (parts-per-billion, 10⁻⁹)

todas ellas ayudan a aliviar el cambio climático cuando el almacenamiento de carbono se intensifica (Lal, 2004; Miller, 2008)¹¹.

6.1.1.1 Métodos utilizados para determinar los costos energéticos

Para calcular la absorción de carbono se pueden usar diversos métodos, tanto directos como indirectos. Una medida indirecta consiste en estimar los costos energéticos relativos a la producción de un producto, o «costos ambientales» de una entidad o producto. Entre los métodos están por ejemplo la «huella ecológica» y el «eco-indicador 99». Se reconoce que los métodos utilizados no son de ninguna manera perfectos y que es necesario estandarizarlos para llegar a resultados comparables significativos (Bartley *et al.*, 2007). Recientemente, Huijbregts *et al.* (2007) trataron de comparar el uso de ambos métodos para evaluar 2 360 productos y servicios, incluida la agricultura. Los autores concluyeron que la utilidad de la huella ecológica como indicador independiente del impacto ambiental es limitada en lo que respecta al ciclo vital de algunos productos, y que el uso de la tierra y de los combustibles fósiles son importantes motores de los impactos ambientales generales.

6.1.1.2 Costos comparativos de la energía en la acuicultura y de otros tipos de alimentos

Pese a las incertidumbres relativas a la evaluación de los costos ecológicos de los procesos productivos, se han realizado muchos estudios sobre los costos energéticos que acarrea la cría de animales (Bartley *et al.*, 2007). Por ejemplo, en las Tablas 9 y 10, respectivamente, se ofrece una comparación entre los costos energéticos relativos a algunos productos de acuicultura y a algunos animales cultivados seleccionados, y una clasificación de los alimentos según su contenido energético en proteínas comestibles y los insumos energéticos industriales. Resulta patente la discrepancia en los datos aportados por diferentes autores para un mismo producto, y ello plantea nuevamente la necesidad de estandarizar las técnicas y unidades para facilitar las comparaciones directas (Bartley *et al.*, 2007; Huijbregts *et al.*, 2007; Tyedmers y Pelletier, 2007).

TABLA 9
Energía utilizada en diferentes sistemas de cultivo

Sistema	Consumo de energía industrial			Unidades
	Energía directa	Energía indirecta	Total	
Cultivo semi-intensivo de camarones [@]	55	114	169	GJ t ⁻¹
Camarón tailandés [#]	na	na	45,6	MJ kg ⁻¹
Camarón marino	54,2	102,5	156,8	MJ kg ⁻¹
Cultivo de salmón en jaulas ^{\$}	9	99	105	GJ t ⁻¹
Cultivo intensivo de salmón en jaulas [@]	na	na	56	GJ t ⁻¹
Salmón ^{\$}	11,9	87	99	MJ kg ⁻¹
Salmón noruego cultivado [#]	na	na	66	MJ kg ⁻¹
Estanques de truchas [@]	na	na	28	GJ t ⁻¹
Cultivo de mero/róbalo en jaulas [@]	na	na	95	GJ t ⁻¹
Carpas, reciclado intensivo [@]	na	na	56	GJ t ⁻¹
Carpas, sistemas de recirculación ^{\$}	22	50	50	MJ kg ⁻¹
Estanques de carpas, vertido de alimentos y fertilizante [@]	na	na	11	GJ t ⁻¹
Cultivo semi-intensivo de carpas ^{\$}	26	01	27	
Estanques de bagres [@]	na	na	25	GJ t ⁻¹
Bagre ^{\$}	5,4	108	114	MJ kg ⁻¹
Tilapia ^{\$}	0	24	24	MJ kg ⁻¹
Pollos noruegos [#]	na	na	55	MJ kg ⁻¹
Carne de vaca sueca [#]	na	na	33	MJ kg ⁻¹

Datos tomados de: @- Bunting y Pretty, 2007; #- Munkung y Gheewala, 2007; \$- Troell *et al.*, 2004. n.d. = no disponible.

¹¹ www.epa.gov/sequestration/forestry.html

TABLA 10
Clasificación de alimentos seleccionados según la razón rendimiento de energía proteínica comestible (EP)-insumos de energía industrial (EI), expresada en porcentaje

Tipo de alimento, comprendida la tecnología, el medio ambiente y la localidad	%EP/EI
Carpa, cultivo extensivo, agua dulce, varios tipos	100-111
Algas marinas, maricultura, Caribe	50-25
Pollos, cría intensiva, Estados Unidos de América	25
Tilapia, cultivo intensivo, estanques de agua dulce, Indonesia	13
Mejillones, líneas marinas largas, Escandinavia	10-5
Tilapia, agua dulce, Zimbabue	6,0
Carne de vaca, pasturas, Estados Unidos de América	5,0
Carne de vaca, parcelas de engorde, Estados Unidos de América	2,5
Salmón atlántico, cultivo intensivo, jaulas marinas, Canadá	2,5
Camarón, cultivo semi-intensivo, Colombia	2,0
Cordero, Estados Unidos de América	1,8
Róbalo, cultivo intensivo en jaulas marinas, Tailandia	1,5
Camarón, cultivo intensivo, Tailandia	1,4

Fuente: Tyedmers y Pelletier, 2007. Se ruega al lector remitirse a estos autores para obtener las referencias originales.

A pesar de las discrepancias, se evidencian algunas tendencias generales. En lo que respecta a la acuicultura, el costo energético total del cultivo de camarones y peces carnívoros tales como el salmón es relativamente alto y el rendimiento proteínico es más bien bajo en comparación con los insumos de energía. De hecho, el rendimiento proteínico porcentual referido a los insumos de energía por unidad de peso de camarón y salmón producida es incluso más bajo que para el pollo, el cordero y la carne de vaca (Tabla 10). Por otra parte, el salmón y los peces marinos proveen otros elementos nutricionales importantes para la salud humana que es preciso tener en cuenta en este tipo de comparaciones.

Análogamente, los beneficios relativos derivados del cultivo de peces omnívoros y otros productos tales como el mejillón y las algas marinas son mucho más altos que los generados por el cultivo de peces carnívoros y/u otros animales de ganadería. Es obvio que el cultivo de carpas, un grupo de especies omnívoras que se alimenta en los eslabones bajos de la cadena trófica, es rentable en términos de energía; este hecho también fue patente en los anteriores análisis del uso de harina y aceite de pescado en la acuicultura (Sección 5.4.1). El cultivo de la carpa produce rendimientos proteínicos un 100 por ciento superiores respecto a los insumos energéticos (Tabla 10), un valor no igualado por ningún otro sistema de cultivo. Es hora de que el sector produzca modelos cuantitativos sobre estos aspectos para facilitar el avance mundial de la acuicultura en un contexto de materias tan urgentes como el cambio climático. Estos análisis son muy pertinentes para los países en desarrollo porque en ellos se realiza el grueso de las actividades acuícolas, las cuales suponen no solo medios de vida sino que contribuyen significativamente al ingreso de divisas de los países.

6.2 Estimación de la contribución potencial de la acuicultura al cambio climático

Es preciso aceptar que todas las formas de cultivo suponen algún costo energético, y la acuicultura no constituye una excepción. Este hecho debe ser ponderado frente a otros factores, por ejemplo que, a diferencia de la agricultura terrestre y la cría de animales, existen, en el sector de la acuicultura, potencialmente más de 300 especies entre las que es posible elegir (FAO, 2007). En muchos casos, las prácticas que se habrán de adoptar estarán determinadas por las fuerzas de mercado.

Son buenos ejemplos en este sentido la acuicultura del camarón, de los salmónidos y de los peces marinos. Estos últimos han registrado una importante fase de crecimiento gradual a raíz de una demanda de mercado que tiene por objeto especies como los meros, los pargos y los lábridos, todas en declive en las pesquerías de captura. El

TABLA 11

Resultados de la evaluación de impactos en el ciclo biológico del camarón tigre en bloque y del camarón patiblanco del Pacífico (cpP) congelado rápido individual (CRI)

Categoría de impacto	Unidad	Bloque (de 1,8 kg) de camarón tigre ^a	4 bolsas (de 453 g) de cpP CRI ^a
Potencial de agotamiento abiótico (PAA)	kg Sb eq*	0,32	0,19
Potencial de recalentamiento mundial (PRM100)	kg CO ₂ eq	19,80	27,31
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1,79	3,04
Eco-toxicidad acuática del agua dulce	kg 1,4-DB eq	0,25	0,41
Eco-toxicidad acuática marina	kg 1,4-DB eq	1660,00	2071,00
Eco-toxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,02	0,02
Acidificación	kg SO ₂ eq	0,07	0,14
Eutrofización	kg PO ₄ eq	0,22	0,19

* Equivalentes de extracción de antimonio (agotamiento); ** kg, 1,4-equivalentes de emisiones de diclorobenceno (1,4-DB)/kg como unidades de toxicidad normalizadas.

Fuentes: #- Mungkung, 2005; @- Mungkung et al., 2007

aumento de la demanda de mercado de estas especies de alto valor responde también a factores análogos a los que se han traducido en el incremento del consumo de carne en los países en desarrollo.

El costo medioambiental de la acuicultura del camarón es el más alto, entre todos los productos del sector. Esta acuicultura es muy importante económicamente en varias regiones tropicales de Asia y América del Sur. Puesto que requiere aeración constante e intercambio de agua, el cultivo del camarón consume por lo general, en comparación con los demás productos cultivados, una abundante cantidad de energía. Además, el camarón cultivado se destina sobre todo a los mercados de exportación y por tanto necesita un alto nivel de elaboración, lo que supone costos energéticos relativamente elevados. En publicaciones recientes sobre evaluaciones del ciclo biológico relacionadas con la producción del camarón patiblanco del Pacífico, *Penaeus vannamei*, congelado rápido individual (Mungkung, 2005; Mungkung et al., 2007; Mungkung y Gheewala, 2007) (Tabla 11) revelaron que el cultivo del camarón tigre, *P. monodon*, en Asia es con mucho más rentable ecológicamente que el de la especie exótica *P. vannamei*. En todos los aspectos ecológicos y desde el punto de vista de la contribución al recalentamiento mundial, el cultivo de *P. monodon* es más ventajoso. Estos aspectos deben ser tomados en consideración en los debates sobre la introducción de especies exóticas, tal como el reciente debate sobre el cultivo del camarón asiático en Asia (De Silva et al., 2006). Quizá haya llegado la hora para que como medida de adaptación al cambio climático se considere la acuicultura no solo a la luz de las ganancias económicas futuras directas (que a menudo tienden a ser de corto plazo) sino también en cuanto a su contribución a los factores que repercuten en el cambio climático visto como un todo. Un buen ejemplo es la introducción de *P. vannamei*, una especie de alto rendimiento que, a diferencia de la nativa *P. monodon*, arroja beneficios económicos rápidos (Wyban, 2007).

La mayor parte de la producción de acuicultura se orienta a productos que, desde una perspectiva ambiental, son relativamente más rentables que el camarón (Tabla 12). El Recuadro muestra que en general el crecimiento mundial de la acuicultura de peces ha tendido hacia organismos que se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica y para cuya producción, desde un punto de vista ecológico, se consume menos energía. Por consiguiente, el aumento de las emisiones de carbono derivadas de la acuicultura de peces son mínimas, y menores que las que genera la producción de la mayor parte de los demás productos básicos alimentarios.

Además, la acuicultura de moluscos y el cultivo de algas marinas –que está en vías de expansión (véanse también las Figuras 10 y 12)–, en particular en las regiones tropicales, contribuyen significativamente a la absorción de carbono. Es más, a causa del rápido ciclo de rotación de los cultivos de algas marinas –aproximadamente de tres meses por

TABLA 12
Producción, en 1995 y 2005, de peces cultivados (x 103 toneladas) que se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica, y el crecimiento general durante el período de diez años

Especies	1995	2005	Crecimiento %
Carpa plateada	2 584	4 153	60,7
Carpa herbívora	2 118	3 905	84,4
Carpa común	1 827	3 044	66,6
Carpa cabezona	1 257	2 209	75,7
Carpín	538	2 086	287,7
Tilapia del Nilo	520	1 703	227,5
Labeo rohu	542	1 196	120,7
Catla	448	1 236	175,9
Mrigal	330	421	21,6
Carpa negra	104	325	212,5
Total	10 359	20 187	94,9
Otros peces de agua dulce (nei)	2 581	5 591	116,6
Total (agua dulce)	12 940	25 778	99,2
Todos los peces	15 616	31 586	102,2

cosecha (en las zonas tropicales), con rendimientos que superan las 2 500 toneladas por hectárea— se excede ampliamente el índice de absorción potencial de carbono obtenible mediante otras actividades agrícolas para una superficie comparable. El cultivo del camarón y de peces carnívoros son las actividades acuícolas que más consumen energía, y han servido como argumento para las críticas dirigidas a todo el sector por los grupos de presión ambientalistas. Éstas son en gran parte injustas porque se basan en solo dos productos que representan menos del 10 por ciento de la producción acuícola mundial.

7. OTRAS MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

En las secciones anteriores se examinaron sobre todo desde un punto de vista técnico las medidas plausibles de adaptación para combatir o mitigar las repercusiones del cambio climático en la acuicultura, incluidos los aspectos sociales conexos. Se ha demostrado últimamente que los logros en el campo de la acuicultura debían casi siempre complementarse con cambios o procedimientos de adaptación relevantes de tipo institucional, normativo o de planificación (De Silva y Davy, en prensa), y se esperaba que, para ser efectivos y sostenibles, los procedimientos de adaptación a las repercusiones del cambio climático sigan ese ejemplo.

7.1 Medidas institucionales, normativas y de planificación

En lo que respecta a las medidas institucionales y normativas, las siguientes son áreas prioritarias para el desarrollo del sector:

- adoptar un enfoque ecosistémico de la acuicultura (EEA) como estrategia mundial;
- dar prioridad y potenciar la maricultura y en especial la acuicultura sin piensos (organismos filtradores, algas);
- potenciar el uso de cuerpos de agua continentales apropiados mediante pesquerías basadas en el cultivo y prácticas idóneas de desarrollo de poblaciones.

El propósito del EEA consiste en integrar la acuicultura con el ecosistema ampliado de tal manera que se consiga promover la sostenibilidad de los sistemas sociales y ecológicos entrelazados (SOFIA, 2006; Soto *et al.*, 2008).

Como sucede con cualquier enfoque sistémico de gestión, el EEA abarca todo el abanico de partes interesadas, esferas de influencia y otros procesos entrelazados. En el caso de la acuicultura, la aplicación del enfoque basado en el ecosistema supone que, al planificar el desarrollo comunitario, se abarquen los sistemas físico, ecológico, social y económico y se tomen en cuenta las aptitudes y experiencias de las partes interesadas, dentro del contexto social, económico y ambiental extendido de la acuicultura.

El EEA subraya la necesidad de integrar la acuicultura con otros sectores (p. ej., la

pesca, la agricultura, el desarrollo urbano) que comparten y utilizan recursos comunes (la tierra, el agua, los piensos, etc.) y de concentrarse en diferentes escalas espaciales; *i*) la granja; *ii*) la zona dedicada a la acuicultura, el cuerpo de agua o la cuenca hidrográfica donde se desarrolla la actividad, y *iii*) la dimensión mundial (Soto *et al.*, 2008).

La aplicación del EEA a escala del cuerpo de agua es quizá una de las formas de adaptación al cambio climático más pertinentes. El ámbito geográfico de actuación de las autoridades encargadas del desarrollo de la acuicultura (es decir, los lindes administrativos) suele no incluir los límites de cuencas hidrográficas, y esto representa una seria dificultad porque las medidas de prevención y adaptación relacionadas con el cambio climático necesitan de una gestión de cuencas, es decir la protección de las zonas costeras contra los deslizamientos de tierra, la sedimentación, las descargas o, simplemente, la provisión de agua para la acuicultura.

Por otra parte, la acuicultura puede proporcionar medios de adaptación a las comunidades agrícolas costeras que deben hacer frente a los efectos de la salinización debido a la subida del nivel del mar. En las regiones costeras, gracias a la maricultura se pueden crear oportunidades para producir proteínas animales cuando el agua dulce escasea. El enfoque basado en las cuencas hidrográficas precisa de cambios normativos y acciones de integración entre diferentes sectores (p. ej., el sector agrícola y la acuicultura), además del fomento de la capacidad y los requisitos en materia de infraestructuras.

Puesto que el cambio climático no reconoce fronteras políticas, las políticas de adaptación y la planificación de cuencas hidrográficas internacionales pueden representar un gran desafío. Sin embargo, las repercusiones del cambio climático, al suponer una amenaza común, pueden brindar la oportunidad de instituir una ordenación transfronteriza.

Para el sector de la acuicultura, también se necesita implantar un enfoque a escala de la cuenca hidrográfica con el objeto de diseñar métodos de adaptación conjuntos con los cuales negociar un seguro colectivo, ejecutar medidas de bioseguridad apropiadas, etc. Ejemplos de estos procedimientos, iniciados no necesariamente como medidas de adaptación para hacer frente a las repercusiones del cambio climático, existen en el sector del cultivo de camarones en la costa oriental de la India (Umesh *et al.*, en prensa). En este caso se ha comprobado que el enfoque puede aplicarse a otros sectores comparables de explotación en pequeña escala.

Se estima que el EEA representa una estrategia cada vez más apropiada que asegura la sostenibilidad, en especial en lo que respecta a una planificación consciente de las repercusiones del cambio climático. A continuación se describen otros elementos relacionados que es preciso considerar en las políticas y en la planificación.

7.1.1 Seguros en la acuicultura

Una medida de adaptación encaminada a limitar la quiebra de empresas acuícolas resultantes de pérdidas provocadas por fenómenos climáticos consistirá en estimular a los acuicultores a contratar seguros contra daños a las poblaciones y a la propiedad causados por los fenómenos climáticos extremos. Una cobertura de seguro adecuada garantizará por lo menos que haya fondos disponibles para que la empresa vuelva a funcionar. Los seguros acuícolas están bien implantados para los principales productos como el salmón y el camarón producidos a escala industrial, pero los seguros no suelen ser contratados por los pequeños acuicultores.

En Asia (Secretan *et al.*, 2007), donde se realiza la mayor parte de las actividades acuícolas en pequeña escala, los planes de seguros serían particularmente pertinentes; y los gobiernos deberían decretar su obligatoriedad para las empresas acuícolas que superan un determinado tamaño. A largo plazo, se reducirían así las pérdidas relacionadas con producción, los medios de vida y los potenciales daños ambientales, por ejemplo los que se asocian con la fuga de ejemplares.

7.1.2 *Investigación y transferencia de tecnología*

Es necesario llevar a cabo investigaciones específicas para adaptar las actividades acuícolas al cambio climático. Los países y regiones deberán racionalizar sus trabajos sobre temas como las nuevas enfermedades y tratamientos preventivos, la fisiología acuática animal, la búsqueda de especies nuevas mejor adaptadas, mejores piensos y prácticas de alimentación animal más acordes con el ecosistema. Los mecanismos de transferencia tecnológica deben llegar a los acuicultores, especialmente a los pequeños acuicultores. Es en este contexto que es preciso integrar en las estrategias relativas al EEA las prácticas mejoradas que se aplican en la acuicultura en pequeña escala. Algunas medidas prácticas al alcance de muchos países se describen a continuación.

7.1.2.1 *Aplicar las lecciones sacadas de la expansión del cultivo de especies fuera del ámbito natural de distribución de éstas*

El recalentamiento mundial representa una amenaza potencial inminente y resulta evidente que es necesario evaluar las formas de adaptación para las especies cultivadas, sobre todo en las regiones templadas. Un enfoque sencillo al respecto consistiría en «aprender de la experiencia de la expansión de las especies cultivadas fuera de su ámbito originario». Gran parte de este «conocimiento adaptativo» podría ya existir en el seno del sector entre los acuicultores pioneros, y ha llegado quizá el momento de recolectar esta información en todo el mundo. Por ejemplo, hay un cuerpo de conocimientos sobre la acuicultura del salmón en zonas más allá del ámbito de distribución natural, bajo diferentes condiciones climáticas y meteorológicas y la vulnerabilidad de los individuos a enfermedades viejas y nuevas. Se pueden encontrar ejemplos similares respecto a la tilapia y el camarón patiblanco. También es posible utilizar las cepas genéticamente mejoradas que se han adaptado con mayor éxito a ciertas condiciones exóticas. Pero es necesario proceder con cuidado en lo que concierne al desplazamiento de los organismos vivos.

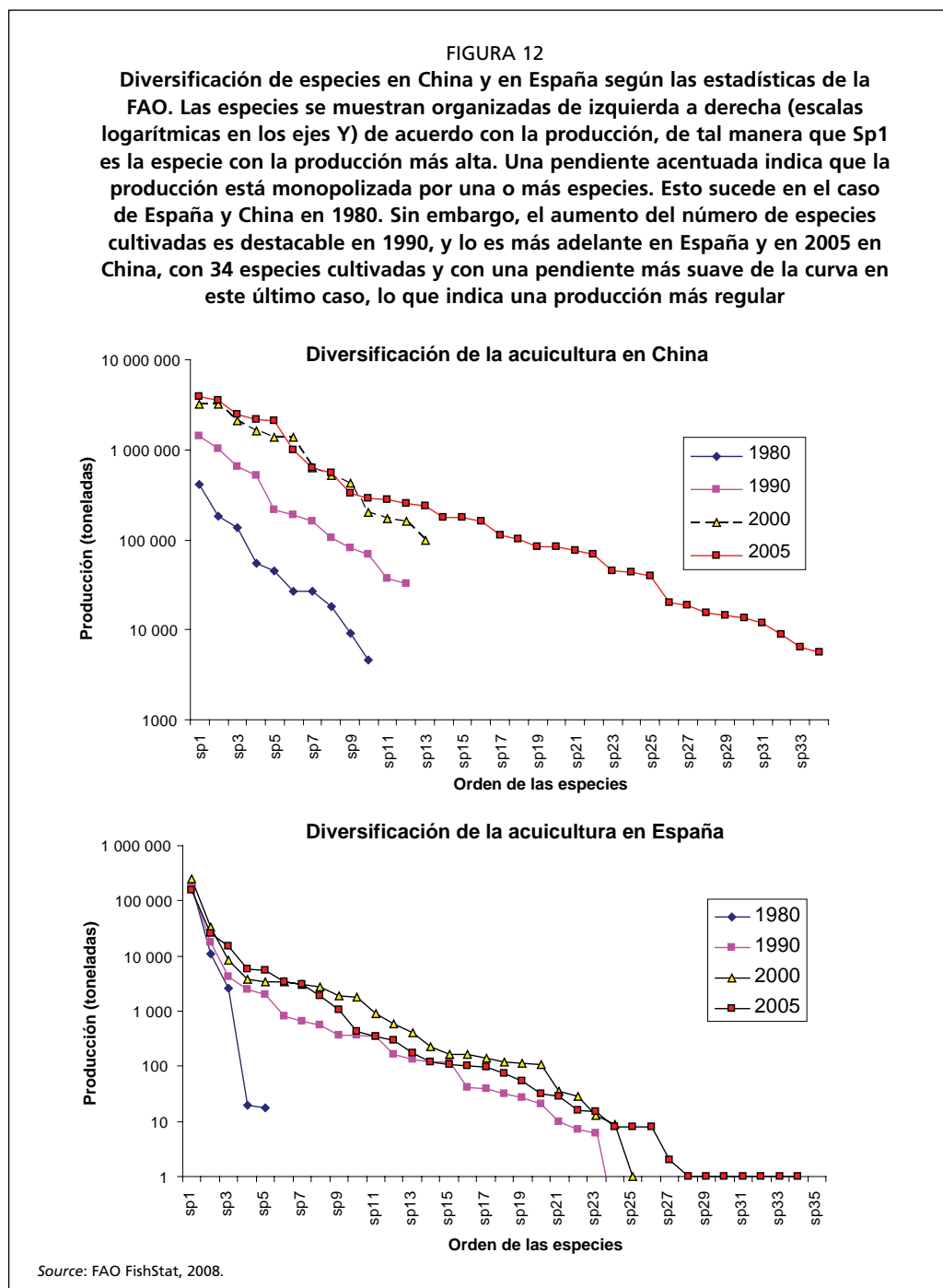
7.1.2.2 *Diversificación de la acuicultura*

En muchos países y regiones, existe una clara tendencia a la diversificación de las especies cultivadas y de la tecnología (FAO, 2006). Duarte *et al.* (2007) muestran la rapidez con que se lleva a cabo la diversificación y lo que ellos llaman la «domesticación de nuevas especies destinadas a la acuicultura» y en particular a la maricultura. Según los autores, el proceso se está desarrollando mucho más rápidamente de lo que ocurrió en el caso de la zootecnia o la fitotecnia, y ello pone de relieve la importancia de los mecanismos de adaptación. La Figura 12 muestra la diversificación relativamente rápida de la acuicultura en China y España.

En China, se observa un salto considerable en cuanto a diversificación acuícola: se ha pasado de 13 especies cultivadas en 2000 a 34 en 2005. En términos evolutivos, se tiene entendido comúnmente que la diversidad proporciona terreno para la selección natural y para la adaptación; también se puede plantear que el cultivo de un número mayor de especies representa una forma de seguro y ofrece mejores posibilidades de adaptación bajo diferentes escenarios de cambio climático, en especial en cuanto a acontecimientos inesperados tales como enfermedades o problemas relacionados con el mercado.

La diversificación exige que los consumidores reciban educación y una información adecuada acerca de las especies y productos, y que la tecnología sea transferida de manera coordinada y eficaz a los nuevos profesionales. La promulgación de políticas nacionales y mundiales puede facilitar la diversificación de la acuicultura y al mismo tiempo reforzar las especies ya consolidadas.

La diversificación puede formar parte de un programa de seguros para el sector a nivel del país y de la región.



7.1.3 Zonificación y seguimiento en la acuicultura

Una adecuada selección de sitios y zonificación en la acuicultura pueden ser medidas importantes de adaptación al cambio climático. Al seleccionar los sitios es esencial determinar las amenazas posibles llevando a cabo una evaluación analítica de riesgos. En particular en las zonas costeras y en las zonas más expuestas, es preciso tomar en consideración los riesgos relacionados con el clima. Por ejemplo, las granjas camaroneras que se construyan en las costas deberán ser dotadas de diques u otras estructuras protectoras. Las jaulas piscícolas deberán ser fijadas sólidamente al fondo o a una estructura de soporte. En algunos lugares de mar abierto se ha propuesto el uso de jaulas sumergibles que puedan resistir las condiciones adversas del clima.

El calentamiento del agua y la insuficiencia de oxígeno asociada, el potencial aumento de la eutrofización, etc. son factores que es posible evitar o reducir a su

mínima expresión en los lugares más profundos donde la circulación es más abundante. Sin embargo, con la exposición a condiciones extremas hay siempre algo que sacrificar. La probabilidad de difusión de enfermedades se puede limitar aumentando la distancia mínima entre las granjas e implantando programas de bioseguridad severos en los complejos o zonas dedicadas a la acuicultura.

También es muy importante operar un sistema de notificación de riesgos, pero las comunicaciones deben ser fiables y rápidas y la información transmitida exacta. A este respecto, la calidad de los sistemas de información meteorológica está mejorando en todo el mundo procurando impedir los grandes daños que puedan sufrir las infraestructuras y la biomasa.

En lo que concierne a la acuicultura, los dispositivos de prevención más importantes deben comportar un protocolo de seguimiento crítico y efectivo de los cuerpos de agua y los organismos acuáticos. Una medida de adaptación de gran trascendencia a nivel local y a escala del cuerpo de agua y de la cuenca consiste en implementar sistemas de seguimiento integrados. Estos sistemas tienen por objeto proporcionar información apropiada sobre las condiciones físicas y químicas de los ambientes acuáticos, y permiten hacer una detección temprana de la presencia de plagas y enfermedades, en especial de la proliferación de algas nocivas. A menudo, los agricultores rurales no suelen disponer de las condiciones o facilidades para aplicar ellos mismos los procedimientos de seguimiento. Sin embargo, existen algunas mediciones muy simples que sí pueden llevar a cabo, como la lectura de la temperatura del agua y la lectura de los discos Secchi. Estos últimos se usan con frecuencia para detectar anticipadamente las floraciones de algas. Para preparar y poner sobre aviso a las partes interesadas, lo ideal sería que las autoridades locales ayudaran en aplicación de los procedimientos de seguimiento integrado y sus estrategias complementarias de comunicación de riesgos y en la implementación de sistemas de alerta temprana. Algunos ejemplos interesantes son los programas de seguimiento de mareas rojas aplicados en el ámbito del cultivo de mejillones en las rías gallegas en España y los programas de seguimiento para el cultivo del salmón. El Instituto Tecnológico para el Control del Medio Marino de Galicia dispone de un programa de seguimiento permanente accesible a través de Internet que da informaciones de situaciones de emergencia y de alerta temprana sobre mareas rojas y demás condiciones del agua útiles para el cultivo de mejillones¹². En Chile, la Asociación de la Industria del Salmón mantiene una base integrada de seguimiento que suministra diferentes parámetros relativos a las condiciones del agua que se recogen mediante un sistema permanente de registro de informaciones (boyas automáticas y muestreo manual). Esta información se entrega a diario a los acuicultores a través de la Web y también es difundida en regiones remotas por las radios locales¹³.

8. CONCLUSIONES

En las últimas dos o tres décadas, el sector de la acuicultura se ha establecido como uno de los principales sectores alimentarios, y ha sido capaz de satisfacer una proporción significativa de las necesidades de proteínas animales de todas las comunidades, cualesquiera sean sus respectivas condiciones de vida. Este logro se ha alcanzado pese a muchas circunstancias adversas, ante las cuales el sector ha demostrado su resiliencia y adaptabilidad. Así como sucede con todos los sectores de la producción de alimentos, el de la acuicultura enfrenta hoy otro gran desafío: el impacto del cambio climático. Es probable que en vista de su resiliencia y adaptabilidad y de la gran variedad de las especies o grupos de especies cultivadas, la acuicultura pueda responder positivamente a las repercusiones climáticas. Para que esto sea posible, debe existir una política adecuada y deben tener lugar cambios socioeconómicos que es preciso respaldar y suplementar

¹² www.intecmar.org/informacion/biotoxinas/EstadoZonas/Mapas.aspx?sm=a1

¹³ www.salmonchile.cl/frontend/index.asp

con avances técnicos adecuados. De preferencia, debe adoptarse un enfoque holístico y un enfoque que proceda de abajo hacia arriba, y no al contrario. Esto último es crucial ya que el grueso de las actividades acuícolas son actividades en pequeña escala; las empresas son propiedad de los acuicultores y son ellos quienes las operan y gestionan, en especial en Asia, región que es el epicentro de la acuicultura mundial. Los cambios adaptativos solo se podrán llevar a cabo eficaz y oportunamente si se incorporan los conocimientos nativos y se obtiene la cooperación de las bases.

Se piensa que a lo largo de los milenios han tenido lugar en la Tierra muchos cambios climáticos que han acarreado importantes alteraciones en la flora y la fauna. Las razones de estos cambios no siempre resultan obvias ni se aceptan universalmente. Pero se sabe que las variaciones climáticas que hoy afectan a la Tierra se deben a las actividades antropogénicas, y que comenzaron con la última revolución industrial. Los agentes causales de los cambios –y por lo tanto las medidas de mitigación que es preciso adoptar– han sido bien entendidos y examinados con gran rigor científico (IPCC, 2007).

Las necesidades humanas de alimentos y la producción de alimentos han sufrido las repercusiones del clima, y estas modificaciones serán, durante las décadas próximas, motivo de grandes preocupaciones, especialmente en los países en desarrollo. Se predice que las repercusiones del cambio climático serán particularmente negativas y sus efectos muy perjudiciales para los países pobres en desarrollo considerando el crecimiento pronosticado de la población humana a lo largo de las décadas venideras, el hecho de que la producción de alimentos no se realiza homogéneamente a través del globo, y que la consecución de la seguridad alimentaria no es pareja en los distintos lugares del mundo (Kerr, 2006).

Otras víctimas serán las especies de flora y fauna menos dotadas de la capacidad de adaptarse a los cambios climáticos; se cree que incluso con un cambio climático modesto durante las próximas décadas la producción de los cultivos comenzará a disminuir en las zonas de baja latitud (Kerr, 2006) que son las zonas donde la acuicultura es la actividad predominante. Sin embargo es alentador notar que muchas innovaciones relacionadas con la acuicultura han derivado de iniciativas llevadas a cabo por las bases y que éstas no han tardado en jugar un papel de protagonistas adaptando a sus necesidades los avances técnicos críticos. En este sentido, se espera que los pequeños acuicultores en zonas rurales estén muy atentos a las repercusiones del cambio climático y tomarán las necesarias medidas de adaptación.

En el escenario general de los sectores productores de proteínas animales, la contribución del pescado está muy por detrás de las fuentes de proteínas animales terrestres. Por ejemplo, el consumo de carne per cápita en el mundo en desarrollo ha sido mucho mayor, y ha aumentado de 15 kg en 1982 a 28 kg en 2002, esperándose que llegue a 37 kg en 2030 (Gerber *et al.*, 2007), en comparación con el consumo de pescado que era de 16,6 kg en 2005 (FAO, 2007). En cuanto a predominancia en los países, los sectores de la producción de carne y de la producción de pescado han cambiado y se han redireccionado pasando de los en desarrollo a los desarrollados (Gerber *et al.*, 2007; Delgado *et al.*, 2003). Es sabido que el consumo diario de carne ha aumentado linealmente en relación con los ingresos per cápita (Houtman, 2007), aunque para el pescado este análisis no está disponible.

La mayor diferencia entre los dos sectores es que el suministro de peces comestibles proviene aún principalmente de la pesca de captura y no del cultivo, pero el aumento futuro de la demanda será satisfecho en su mayor parte por la acuicultura (véase las Secciones 2.1 y 2.2). En el mejor de los casos, la importancia de la pesca de captura se mantendrá en su nivel actual, y es muy probable que a causa del cambio climático tienda a disminuir. Por consiguiente, la acuicultura cubrirá las lagunas de suministro y satisfará las crecientes necesidades humanas de pescado.

Aunque es solo un sector productor de alimentos relativamente pequeño, la acuicultura contribuye significativamente a los aportes de proteínas animales de la

cesta alimentaria. El aporte de la acuicultura ha pasado de 0,7 kg per cápita en 1970 a 6,4 kg en 2002; y el número de personas activas en el sector de la producción es de aproximadamente 10 millones. Este incremento es significativamente mayor que el de la ganadería terrestre, que se expandió sólo a una tasa del 2,8 por ciento anual durante el mismo período (Bunting y Pretty, 2007), y refleja la emergencia tardía de la acuicultura como sector que contribuye significativamente a la alimentación humana. Es importante destacar que la acuicultura ha sido objeto de riguroso escrutinio en lo que respecta a sus repercusiones ambientales, probablemente porque el sector ha empezado a tener una función destacada solo durante las últimas tres décadas más o menos, período que ha coincidido con una toma de conciencia mundial acerca del desarrollo sostenible y la integridad medioambiental (PNUMA, 1987; CDB, 1994).

A diferencia de muchos otros sectores de la producción de carne animal, la acuicultura, que es sector que cultiva animales poiquilotermos, se distribuye irregularmente por las diversas regiones, concentrándose mayormente en las regiones subtropicales y tropicales de Asia, en las partes continentales y en las costas, y en menor grado en las costas templadas de Europa y América del Sur. Dada esta forma de distribución, es posible que las principales repercusiones del cambio climático deriven del recalentamiento mundial y del consiguiente aumento de la temperatura del agua. Se predice que estos cambios serán más significativos en las aguas frescas y que afectarán a la acuicultura de regiones templadas, donde se cultivan salmónidos y moluscos.

No se descarta que el calentamiento dé lugar a proliferaciones más frecuentes de algas tóxicas y a la emergencia de patógenos hasta la fecha durmientes, que representarían amenazas concretas para el cultivo de moluscos. Las medidas de adaptación para contrarrestar estos efectos negativos son muy pocas, aparte de la vigilancia que se ejerce mediante un seguimiento regular.

Para el cultivo de los salmónidos, una medida de adaptación consistiría en determinar si es posible desarrollar cepas tolerantes a temperaturas más altas comprendidas entre 19 y 20 °C.

Los aumentos pronosticados de la temperatura del agua corresponden a valores que a menudo calzan con el rango de temperaturas óptimas para la mayor parte de las especies cultivadas, en particular en los trópicos y sub-trópicos. Esto significa que el crecimiento de las poblaciones cultivadas en estas regiones se vería en realidad estimulado por el calentamiento y que la producción se incrementaría (véase el Tabla 13).

La subida del nivel del mar y los fenómenos asociados de infiltración de aguas saladas, agravados por el cambio en los patrones del clima monzónico, son motivo de preocupación en las regiones tropicales y subtropicales donde se realiza el grueso de las actividades acuícolas. Las repercusiones de estos acontecimientos serán probablemente más acusadas en las principales zonas deltaicas de los trópicos. Sin embargo, las medidas de adaptación son factibles: por ejemplo, cambiar una especie por otra o llevar a cabo las operaciones de acuicultura en zonas alejadas de la orilla. La intrusión de las aguas saladas imposibilitaría algunas de las prácticas agrícolas terrestres o las haría menos rentables. Gracias a la acuicultura se podría disponer de medios de vida alternativos; y el aporte que esta actividad supone para la alimentación humana podría quizá aumentar. Este proceso podría verse impulsado en parte por el hecho de que los beneficios financieros que arroja la producción acuícola tienden a ser significativamente superiores a los que derivan de la agricultura tradicional por unidad de superficie, y porque el consumo relativo de energía de la acuicultura es menor que el de la ganadería terrestre.

En los trópicos y sub-trópicos, la acuicultura continental es la actividad predominante y lo seguirá siendo en el futuro próximo. No obstante, cuando se considera que la presión sobre la disponibilidad y calidad de agua dulce aumentará potencialmente y que el cambio climático tendrá potenciales repercusiones en los recursos hídricos, resulta difícil predecir cuál será la posibilidad de expansión de la acuicultura de agua dulce a

TABLA 13

Resumen de las repercusiones importantes en la acuicultura de diferentes elementos del cambio climático y potenciales medidas de adaptación

Acuicultura/otras actividades	Impacto(s)		Medidas de adaptación
	+/-	Tipo/forma	
Todas: jaulas, estanques; peces	-	Aumento de la temperatura por encima del rango óptimo de tolerancia	Mejores piensos; cría selectiva para conseguir la tolerancia a temperaturas más altas
Agua dulce; todas	+	Aumento del crecimiento; mayor producción	Aumento del aporte de alimento
Agua dulce; jaulas	-	Eutrofización y surgencia; mortalidad de la población	Mejor planificación; emplazamiento de las instalaciones, ajuste al cambio climático, regulación del seguimiento
Marina/de agua dulce; moluscos	-	Aumento de la virulencia de patógenos durmientes	Ninguna; seguimiento para prevenir los riesgos sanitarios
Peces carnívoros/ camarones*	-	Limitación del suministro y precios de la harina y aceite de pescado	Reemplazo de la harina y aceite de pescado; nuevas formas de gestión de piensos; adopción de productos no carnívoros
Propagación artificial de especies para abastecer a restaurantes de lujo que ofrecen peces vivos.	(+)	Destrucción de los arrecifes de coral	Ninguna; pero la acuicultura hará una contribución positiva al reducir la influencia de factores externos que contribuyen a la destrucción de los corales y al ayudar a conservar la biodiversidad
Aumento del nivel del mar y otros cambios en la circulación			
Todas; principalmente en las regiones de delta	+/-	Infiltración de aguas saladas.	Desplazamiento aguas arriba de las especies estenohalinas: cambio costoso; nuevas especies eurihalinas en las instalaciones viejas
	+/-	Pérdida de tierras agrícolas.	Provisión de medios de vida alternativos por medio de la acuicultura; creación de capacidad e infraestructuras
Peces marinos carnívoros*	-/+	Reducción de las capturas provenientes de las pesquerías costeras artesanales; pérdida de ingresos para los pescadores	Reducción de los suministros de piensos; pero se fomenta el uso de piensos granulados: costos mayores/menor degradación ambiental
Mariscos	-	Aumento de la proliferación de algas nocivas	Mortalidad y aumento de los riesgos relacionados con la salud humana por el consumo de moluscos cultivados
Cambios y pérdidas de hábitat	-	Influencia indirecta en la acuicultura de estuario; poca disponibilidad de semilla	Ninguna
Acidificación			
Cultivo de moluscos/algas marinas	-	Repercusiones en el proceso de calcificación de la concha/deposición	Ninguna
Estrés hídrico (+ condiciones de sequía, etc.)			
Piscicultura en estanques	-	Limitaciones derivadas de la extracción	Mayor eficiencia en el uso del agua; sistemas de recirculación; fomento de uso no consuntivo del agua en la acuicultura, por ejemplo en las pesquerías basadas en el cultivo
Pesquerías basadas en el cultivo	-	Reducción del periodo de retención de agua	Utilización de especies de peces de crecimiento rápido; mayor eficiencia en la compartición del agua con los usuarios primarios, por ejemplo, irrigación de arrozales
Cultivo en jaulas en zonas ribereñas	-	Disponibilidad reducida de reserva de semillas silvestres/cambio del periodo de disponibilidad	Adopción de semillas propagadas artificialmente; costos extra
Fenómenos meteorológicos extremos			
Todas las formas; principalmente en las zonas costeras	-	Destrucción de instalaciones; pérdida de poblaciones; pérdidas de actividades comerciales; fugas masivas de ejemplares con repercusiones potenciales en la biodiversidad	Fomento de la contratación de seguros individuales o colectivos; mejora de los diseños de las instalaciones para minimizar las fugas masivas de ejemplares; fomento del uso de especies indígenas para minimizar las repercusiones en la biodiversidad

* Caso en que la alteración se deberá a más de un elemento del cambio climático.

plazo medio. La acuicultura continental practicada en los cuerpos de agua existentes tales como lagos, embalses y ríos va en aumento, principalmente en lo que respecta al cultivo en jaulas. Los cambios climáticos esperados podrían ejercer una influencia profunda en los cuerpos de agua estáticos debido al aumento de la eutrofización y estratificación y

causar mortalidad de las poblaciones cultivadas a consecuencia de los fenómenos de afloramiento, agotamiento de oxígeno y otros eventos similares. Sin embargo existen numerosas medidas de adaptación para evitar estas calamidades, y la principal es el desarrollo de una acuicultura que se ajuste a la capacidad de carga potencial del cuerpo de agua y a la normativa que reglamenta tal capacidad, y el seguimiento continuo de las variables ambientales en relación con la carga interna y externa de nutrientes.

Es probable que el impacto del cambio climático en las poblaciones de peces silvestres ejerza efectos significativos en la acuicultura, en particular en cuanto a disponibilidad de materias primas para la producción de harina y aceite de pescado. El costo ecológico de los piensos para animales cultivados es muy alto (Bartley *et al.*, 2007), y la acuicultura de especies carnívoras, que en la actualidad representa solo una pequeña proporción de todos los productos cultivados, no es una excepción a este respecto. El pescado que procede de este sector es de alto valor; y por lo tanto, para solventar este problema conviene diseñar dietas apropiadas en las que las cantidades de harina y aceite de pescado puedan reducirse gradualmente. Este proceso fue iniciado hace 15 años con el desarrollo de dietas para salmónidos de alto contenido energético, pero desde entonces ha habido una interrupción en la utilización de este tipo de dietas.

También es importante restringir el uso de las dietas que contienen aceite de pescado que se administran durante la fase de crecimiento y adoptar «dietas de salida» antes de la cosecha (Jobling, 2003, 2004; Turchini, Francis y De Silva, 2007) para satisfacer la demanda de consumo y mantener la calidad del pescado (Menoyo *et al.*, 2004; Mourente, Good y Bell, 2005).

Por otra parte, la incertidumbre en cuanto a la continuidad de los suministros de harina y aceite de pescado y su proyectada reducción resultante del cambio climático no es privativa de la acuicultura. Los mismos ingredientes se usan en otros sectores de producción animal y en la industria de piensos para mascotas; en los últimos tiempos este último uso para producción de alimentos no destinados al consumo humano ha sido puesto de relieve (Naylor *et al.*, 2000; Aldhous, 2004). Es necesario instaurar un diálogo acerca del uso de un recurso biológico con limitaciones potenciales (De Silva y Turchini, 2008).

El presente análisis también señala la amplia gama de beneficios que derivan del uso de una unidad de harina y/o aceite de pescado en la producción general de los productos acuícolas. A diferencia de la producción animal terrestre, la acuicultura depende de una gran variedad de especies, cuyo número ronda en la actualidad las 300 (FAO, 2007). En un intento de hacer una comparación significativa entre los costos ambientales de la acuicultura y los de otros sectores de la producción de alimentos, se estimó que era prioritario presentar un cuadro equilibrado de los costos ambientales de todos los sectores de la producción de alimentos y de formular políticas ambientales que tomasen en cuenta los impactos ocasionados por todos los sectores (Bartley *et al.*, 2007). No obstante, es evidente que el sector de la acuicultura se encuentra en una situación autónoma, debido a que las diferencias entre los costos ecológicos que acarrea el cultivo de especies carnívoras tales como el salmón o un pez omnívoro/herbívoro tal como la carpa común difieren enormemente de los costos de la cría de pollos o de cualquiera de las especies antes mencionadas que se hace indispensable tratar los distintos productos cultivados como entidades separadas.

El descoloramiento de los corales, fenómeno que se ha agudizado con el cambio climático y sus efectos en la biodiversidad, es un asunto que despierta cada vez mayor preocupación. Es importante considerar este proceso en conjunción con el daño a los corales causado por los métodos de pesca destructivos practicados para satisfacer la demanda de pescado vivo del sector de la alta gastronomía, un comercio de lujo en expansión que se practica en unas pocas regiones de Asia tropical y subtropical. La creciente preocupación manifestada por el público ante este hecho ha conducido a que disminuya mucho la dependencia de los peces silvestres que se capturan para alimentar

este comercio (véase la Sección 5.4.4). Esto indica que gracias a la acuicultura parece ser posible contener la destrucción de los corales y fomentar la conservación de la biodiversidad.

Muchas veces se critica la acuicultura por estimársela una actividad ecológicamente costosa que degrada el ambiente. Estos juicios, que se basan casi siempre en una acuicultura que produce productos de alto valor como el camarón y especies de peces carnívoros como los salmónidos, han creado apreciaciones erróneas entre el público, los planificadores, los promotores y los inversores. El hecho es que el grueso de la acuicultura depende aún de peces y moluscos que se alimentan en los eslabones bajos de la cadena trófica y que funcionan principalmente como sumideros de carbono y ayudan a la absorción de carbono.

A raíz del cambio climático, la acuicultura ha llegado a desempeñar un papel de importancia creciente porque contribuye al aumento de la absorción de carbono y promueve la producción de algas marinas y de peces y moluscos que se alimentan en los niveles inferiores de la cadena trófica. La acuicultura es una actividad muy elástica y resiliente por su capacidad de adaptación al cambio; esto indica cuán mínima puede ser la contribución del sector a las alteraciones climáticas.

Por ejemplo, la adopción de técnicas sencillas destinadas a proporcionar fuentes alimentarias idóneas o mejoradas para las poblaciones cultivadas mediante métodos que aumentan el crecimiento perifítico podrían representar una importante medida de ahorro de energía (véase p. ej. Van Dam *et al.*, 2002).

En términos generales, se predice que las repercusiones del cambio climático en la acuicultura serán sumamente variables según la zona climática donde se desarrolla esta actividad. Será probablemente en las regiones templadas donde las repercusiones más adversas en las actividades acuícolas tengan lugar, a saber:

- por la incidencia en las tasas de crecimiento de especies cultivadas de aguas frías, debido a la superación de los valores óptimos de temperatura para el funcionamiento del organismo; y
- por el aumento de los riesgos potenciales de enfermedades, debido a que la temperatura ha podido superar el ámbito de quiescencia de los patógenos y éstos se han vuelto más virulentos.

En las regiones tropicales y subtropicales, donde predominan las actividades acuícolas, el aumento de la temperatura del agua podría provocar el fenómeno contrario, y traducirse en un aumento de la producción. Además, la subida del nivel del mar también podría tener repercusiones positivas al proporcionar medios de subsistencia alternativos a muchas personas que se dedican a la agricultura terrestre en las zonas de delta. Lo que es aún más importante es que se debe reconocer que la acuicultura representa una modalidad de producción de alimentos que supone un menor consumo de energía en comparación con todas las alternativas.

Los estudios de evaluación del ciclo biológico indican que ciertos productos acuáticos cultivados, en particular el camarón y los peces carnívoros cuya alimentación depende esencialmente de la harina y aceite de pescado, son costosos en términos energéticos. En los países desarrollados y en desarrollo debido a la mejora de las condiciones de vida y a los ingresos disponibles estos son productos muy apetecidos. Su producción se ve impulsada por las fuerzas de mercado, y como hay demanda, la producción de estos productos seguirá contribuyendo a las emisiones generales de carbono, en comparación con los demás productos de acuicultura que son esencialmente absorbentes de carbono.

Una solución posible consistiría en persuadir a los consumidores de que abandonasen el consumo de productos que contribuyen al incremento neto de las emisiones de carbono. Como un cambio de esta envergadura tendría inevitables consecuencias sociales y económicas en los países productores, sería preciso encontrar una fórmula de equilibrio. Así como ya se hace en el caso del eco-etiquetado, quizá la medida de

adaptación consistente en incluir el índice de emisiones potenciales de carbono en los protocolos relacionados con los productos alimenticios de alto valor resulte ser la más apropiada.

Por último, es preciso admitir que es necesario recopilar datos cuantitativos sólidos para afrontar las cuestiones relativas al rol de la acuicultura en el cambio climático. A nivel mundial, los esfuerzos están dirigidos a reducir las emisiones de carbono en todas sus formas, ya provengan éstas de los procesos de producción de alimentos o del transporte.

En lo que respecta a la producción de alimentos, cabe preguntarse si es suficiente realizar un análisis de impactos en términos de energía industrial. Por ejemplo, en la acuicultura de la carpa el uso de energía industrial es mínimo, pero este tipo de acuicultura incide en el ciclo del carbono al fijar CO₂ por intermedio del fitoplancton, parte del cual termina convertido en pescado por vía de la cadena trófica. Asimismo, ¿son los sistemas de acuicultura que se basan en la fertilización y en el fitoplancton más inocuos respecto al clima y al carbono que otras formas de acuicultura más intensivas que consumen considerables insumos energéticos externos?

Todas las interrogantes anteriores deben ser ponderadas en relación con las necesidades de alimentos y las necesidades de desarrollo; y para llegar a decisiones racionales se necesita una gran cantidad de datos y también una voluntad política global.

Este estudio no puede terminar abordando las influencias del cambio climático en la acuicultura en sí, porque, después de todo, la acuicultura no funciona en el vacío. Para evitar la exacerbación de las repercusiones del cambio climático mundial, se ha aceptado universalmente que es preciso realizar acciones unificadas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Una opción a este respecto es limitar la dependencia de los combustibles fósiles como fuente de energía y aumentar consecuentemente la dependencia en los biocombustibles.

La producción de biocombustibles de primera generación deriva de la conversión de almidones vegetales, azúcares, aceites y grasas animales en sustancias energéticas capaces de reemplazar los combustibles fósiles. Actualmente, el más popular entre los biocombustibles es el bioetanol elaborado por fermentación de productos alimentarios tales como el maíz, la yuca y la caña de azúcar (Worldwatch Institute, 2006). En relación a insumos energéticos, el bioetanol de caña de azúcar producido en Brasil es considerado como el combustible con más potencial de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Macedo, Verde y Azevedo, 2004).

Mientras el mundo evalúa los biocombustibles como alternativa de los combustibles fósiles, estos productos han tenido un efecto dominó en los cultivos alimentarios, sus precios, su disponibilidad y su acceso, y en la seguridad alimentaria y la pobreza, y han repercutido de manera general en el desarrollo sostenible (Naylor *et al.*, 2007). Para la fabricación de piensos, la acuicultura y la zootecnia dependen, de una u otra forma y en casi todas sus modalidades, de los mismos cultivos alimentarios usados en la producción de biocombustibles. Por ende, por cuanto respecta al cambio climático no es posible formular una ecuación unidireccional; sino que es preciso incorporar en esta ecuación compleja muchos otros factores con que generar medidas de adaptación evolutiva que es preciso elaborar con arreglo a una perspectiva ecosistémica y no sector por sector.

Bibliografía

- Abery, N.W., Sukadi, F., Budhiman, A.A., Kartamihardja, E.S., Koeshendrajana, S., Buddhiman, A.A. & De Silva, S.S. 2005. Fisheries and cage culture of three reservoirs in west Java, Indonesia; a case study of ambitious developments and resulting interactions. *Fisheries Management and Ecology*, 12: 315–330.
- Aldhous, P. 2004. Fish farms still ravage the sea. Sustainable aquaculture takes one step forward, two steps back. *Nature online*, 17: February 2004; doi:10.1038/news040216–10.
- Allison, E.H., Adger, W.N., Badjeck, M.-C., Brown, K., Conway, D., Dulvy, N.K., Halls, A., Perry, A. & Reynold, J.D. 2005. Effects of climate change on sustainability of capture and enhancement fisheries important to the poor: analysis of the vulnerability and adaptability of fisher folk living in poverty. UK. Project No. R 4778J, Final Technical Report, DFID, 168 pp.
- Allsopp, M., Johnston, P. & Santillo, D. 2008. Challenging the aquaculture industry on sustainability. Amsterdam. Greenpeace. 22 pp.
- Anonymous. 2007. Escapes from aquaculture are a danger to ecosystems. *Eurofish Magazine*, 1/ 2007: pp. 90–93.
- Anonymous. 2008a. The new face of hunger. *The Economist*, 19th April 2008: 3–5.
- Anonymous. 2008b. The silent tsunami. *The Economist*, 19th April 2008: pp1.
- Araguas, R.M., Sanz, N., Pla, C. & Garcia-Martin, J.L. 2004. Breakdown of the brown trout evolutionary history due to hybridisation between native and cultivated fish. *Journal of Fish Biology*, 65 (Supplement A): 28–37.
- Atkinson, A., Slegel, V., Pakjomov, E. & Rothery, P. 2004. Long-term decline in krill stocks and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432: 100–103.
- Aye Khin Maung, Ko Lay Khin, Win Hla & De Silva, S.S. 2007. A new fresh water aquaculture practice that has successfully targeted a niche export market with major positive societal impacts: Myanmar. *Aquaculture Asia*, XII (4).
- Barrange, M. & Perry, I. 2009. Physical and ecological impacts of climate change relevant to marine and inland capture fisheries and aquaculture. In K. Cochrane, C. De Young and T. Bahri (eds). Climate change implications for fisheries and aquaculture. Overview of current scientific knowledge. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 530. Rome, FAO. pp. 212
- Bartley, D.M., Brugère, C., Soto, D., Gerber, P. & Harvey, B. 2007. Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. Rome. FAO Fisheries Proceedings, No 10, 240 pp. FAO.
- Bendiksen, E.A., Jobling, M. & Arnesen, A.M. 2002. Feed intake of Atlantic salmon parr *Salmo salar* L. in relation to temperature and feed composition. *Aquaculture Research*, 33: 525–532.
- Benetti, D.D., Orhun, M.R., Sardenberg, B., O’Hanlon, B., Welch, A., Hoenig, R., Zink, I., Rivera, J., Denlinger, B., Bacoat, D., Palmer, K. & Cavalin, F. 2008. Advances in hatchery and grow-out technology of Cobia, *Rachycentron canadum*. *Aquaculture Research* 39: 701–711.
- Bibby, R., Widdicombe, S., Parry, H., Spicer, J. & Pipe, R. 2008. Effect of ocean acidification on the immune response of the blue mussel, *Mytilus edulis*. *Aquatic Biology*, 2: 67–74.
- Broad, K., Pfaff, A.S.P. & Glantz, M.H. 1999. Climate information and conflicting goals: El Niño 1997–98 and the Peruvian fishery. Public philosophy, environment and social justice, Thursday 21 1999 to Friday 22 October 1999. New York, USA, Carnegie Council of Ethics and International Affairs.

- Brook, E.J., Sowers, T. & Orchardo, J. 1996. Rapid variation in atmospheric methane concentration during past 110 000 years. *Science*, 273: 1087–1990.
- Brown, J.D., Swayne, D.E., Cooper, R.J., Burns, R.E. & Stallknecht, D.E. 2006. Persistence of H5 and H7 avian influenza viruses in water. *Avian Diseases*, 50: 236–242.
- Brugère, C. & Ridler, N. 2004. Global aquaculture outlook in the next decades: an analysis of national aquaculture production forecasts to 2030. FAO Fisheries Circular, No. C1001.
- Bunting, S. & Pretty, J. 2007. Aquaculture development and global carbon budgets: emissions, sequestrations and management options. UK, University of Essex, Centre for Environment and Society, Occasional Paper 2007-1, 39 pp.
- Catto, N.R. 2004. Impacts of climate variation and adaptation for Atlantic Canadian fisheries communities. Moncton, Canada, Canadian Association of Geographers, Annual Meeting, May 2004.
- CBD (Convention on Biological Diversity). 1994. Text and annexes. Switzerland. Interim Secretariat for the Convention on Biological Diversity, 34 pp.
- Collares-Pereira, M.J. & Cowx, I.G. 2004. The role of catchment scale environmental management in fresh water fish conservation. *Fisheries Management and Ecology*, 11: 303–312.
- Crawford, M.A., Bloom, M., Broadhurst, C.L., Schmidt, W.F., Cunnane, S.C., Galli, C., Gehbremeskel, K., Linseisen, F., Lloyd-Smith, J. & Parkington, J. 1999. Evidence for the unique function of docosahexaenoic acid during the evolution of the modern hominid brain. *Lipids*, 34: S39–S47.
- Crump, M. 1998. *In Search of the Golden Frog*. Chicago, USA. University of Chicago Press.
- Dalton, M.G. 2001. El Niño expectations and fishing effort in Monterey Bay, California. *Environmental Economics and Management*, 42: 336–359.
- Daszak, P., Cunningham, A.A. & Hyatt, A.D. 2000. Emerging infectious diseases of wildlife threats to biodiversity and human health. *Science*, 287: 443–448.
- De Deckere, E.A.M., Korver, O., Verschuren, P.M. & Katan, M.B. 1998. Health aspects of fish and n-3 polyunsaturated fatty acids from plant and marine origin. *European Journal of Clinical Chemistry*, 52: 749–753.
- Delgado, C.L., Rosegrant, W.N., Meijer, S. & Ahmed, M. 2003. Fish to 2020. Supply and demand in changing global market. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute, 226 pp.
- De Ionno, P., Wines, G., Jones, P. & Collins, R. 2006. A bioeconomic evaluation of a commercial scale recirculating finfish growout system - An Australian perspective. *Aquaculture*, 259: 315–327.
- De Silva, S.S. 2001. A global perspective of aquaculture in the new millennium. In R.P. Subasinghe, P. Bueno, M.J. Phillips, C. Hough, S.E. McGladdery & J.R. Arthur, (eds) *Aquaculture in the third millennium*, pp. 431–459. Bangkok, NACA.
- De Silva, S.S. 2003. Culture-based fisheries: an underutilized opportunity in aquaculture. *Aquaculture*, 221: 221–243.
- De Silva, S.S. 2007. Meeting the demands and challenges of globalization of trade in aquaculture. The role of a regional inter-governmental body. *Globalization and fisheries: Paris, OECD. Proceedings of an OECD-FAO Workshop*: 229–239.
- De Silva, S.S. & Hasan, M.R. 2007. Feeds and fertilizers: the key to the long term sustainability of Asian aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper, No. 497: 19–48.
- De Silva, S.S. & Phillips, M. 2007. A review of cage culture: Asia (excluding China). In M. Halwart, D. Soto & J.R. Arthur (eds). 2007. *Cage aquaculture: regional reviews and global overview*. FAO Fisheries Technical Paper, No. 498: 21–47.
- De Silva, S.S. & Turchini, G.M. 2008. Towards understanding the impacts of the pet food industry on world fish and seafood supplies. *Journal of Agriculture and Environmental Ethics*, 21: 459–467.

- De Silva, S.S., Amarasinghe, U.S. & Nguyen, T.T.T. 2006. Better-practice approaches for culture-based fisheries development in Asia. Canberra. ACIAR Monograph No. 120, 96 pp. Australian Centre for International Agricultural Research.
- De Silva, S.S., Sim, S.Y. & Turchini, G.M. 2008. Review on usage of fish, directly and indirectly, as feed ingredients and feeds in Asian-Pacific aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper (in press).
- De Silva, S.S., Nguyen, T.T.T., Abery, N.W. & Amarasinghe, U.S. 2006. An evaluation of the role and impacts of alien finfish in Asian inland aquaculture. *Aquaculture Research*, 37: 1–17.
- De Silva, S.S., Subasinghe, R.P., Bartley, D.M. & Lowther, A. 2004. Tilapias as alien aquatics in Asia and the Pacific: a review. FAO Fisheries Technical Paper No. 453: 65 pp.
- De Silva & F.B. Davy (eds). In press. Success stories in Asian aquaculture. Springer.
- Dowling, T.E. & Childs, M.R. 1992. Impact of hybridisation on a threatened trout of the south western United States. *Conservation Biology*, 6: 355–364.
- Edgerton, B.F., Henttonent, P., Jussila, J., Mannonent, A.R., Paasonens, P., Taugbøl, T., Edsman, L. & Souty-Grosset, C. 2004. Understanding the causes of disease in European fresh water crayfish. *Conservation Biology*, 18: 1466–1473.
- Edwards, M., Johns, D.G., Leterme, S.C., Svendsen, E. & Richardson, A.J. 2006. Regional climate change and harmful algal blooms in the northeast Atlantic. *Limnology and Oceanography*, 51: 820–829.
- Edwards, P., Le, A.T. & Allan, G.L. 2004. A survey of marine trash fish and fishmeal as aquaculture feed ingredients in Viet Nam. Canberra. ACIAR Working Paper No 57. Australian Centre for International Agricultural Research: 56 pp.
- Epstein, P.R. 2005. Climate change and human health. *New England Journal of Medicine*, 353: 1433–1436
- Epstein, P.R., Diaz, H.F., Elias, S., Grabherr, G. & Graham, N.E. 1998. Biological and physical signs of climate change: focus on mosquito-borne diseases. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 409–417.
- FAO. 2003. World agriculture: towards 2015/2030: a FAO perspective. Earthscan. Rome, FAO. 432 pp.
- FAO. 2004. FAO recommendations on the prevention, control and eradication of highly pathogenic avian influenza (HPA1) in Asia. FAO Position Paper, Rome. FAO, 49 pp.
- FAO. 2006. State of world aquaculture: 2006. FAO Fisheries Technical Paper. No. 500. Rome, FAO. 134 pp.
(Also available at www.fao.org/docrep/009/a0874e/a0874e00.htm).
- FAO. 2008a. Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Service. Total fisheries production 1950 to 2006. FishStat Plus - Universal software for fishery statistical time series (online or CD-ROM). Rome, FAO.
(Also available at www.fao.org/fi/statist/FISOFT/FISHPLUS.asp).
- FAO. 2008b. FAO Food Outlook 2008. Rome, FAO.
- FAO. 2009. The state of world fisheries and aquaculture 2008. Rome, FAO: 76 pp.
- Feare, C.J. 2006. Fish farming and the risk of spread of avian influenza. Cambridge, UK. WildWings Bird Management, BirdLife International. 11 pp.
(Also available at www.birdlife.org/action/science/species/avian.flu/index.html).
- Ficke, A.D., Myrick, C.A. & Hansen, L.J. 2007. Potential impacts of global climate change on fresh water fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 17: 581–613.
- Fishery Information Technology Centre. 2006. Fishery Statistics of Thailand, 2004. Thailand. Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives, No. 4/2006, 91 pp.
- Flannery, T. 2005. The weather makers. Melbourne, Australia, Text publishing.
- Friedlingstein, P. & Solomon, S. 2005. Contributions of past and present human generations to committed warming caused by carbon dioxide. *PNAS* August 2, 2005, Vol. 102, No 31: 10832–10836. (Also available at www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0504755102.)

- Gajardo, G. & Laikre, L. 2003. Chilean aquaculture boom is based on exotic salmon resources: a conservation paradox. *Conservation Biology*, 17: 1173–1174.
- Gerber, P., Wassenaar, T., Rosales, M., Castel, V. & Steinfield, H. 2007. Environmental impacts of a changing livestock production: overview and discussion for a comparative assessment with other food production sectors. In D.M. Bartley, C. Brugère, D. Soto, P. Gerber & B. Harvey, (eds). Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. Rome. FAO Fisheries Proceedings No 10, 37–54. FAO.
- Gianni, A., Saravanan, R. & Chang, P. 2003. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 320: 1027–1030.
- Gienapp, P., Teplitsky, C., Alho, J.S., Mills, J.A. & Merila, J. 2008. Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses. *Molecular Ecology*, 17: 162–176.
- GPA. 2008. Physical alterations and destruction of habitats. Restoration of mangrove areas. Global Programme for Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities. (Also available at www.padh.gpa.unep.org/page.cfm?region=1&theme=3&topic=12.)
- Goswami, B.N., Venugopal, V., Sengupta, D., Madhusoodanan, M.S. & Xavier, P.K. 2006. Increasing trend of extreme rain events in a warming environment. *Science*, 314: 1442–1445.
- Grøttum, J.A. & Beveridge, M., 2008. A review of cage aquaculture: northern Europe. In M. Halwart, D. Soto & J.R. Arthur, eds. Cage aquaculture. Regional reviews and global overviews. FAO Fisheries Technical Paper No. 498: 126–154. Rome, FAO.
- Halwart, M., Soto, D. & Arthur, J.R. 2007. Cage aquaculture. Regional reviews and global overviews. FAO. Rome. FAO Fisheries Technical Paper. No. 498. Rome, FAO. 240 pp.
- Handisyde, N.T., Ross, L.G., Badjeck, M.-C. & Allison, E.H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Final Technical Report, DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture, Stirling, U.K., 151 pp. Available at www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/pdfs/Climate_full.pdf
- Harvell, C.D., Kim, K., Burkholder, J.M., Colwell, R.R., Epstein, P.R., Grimes, J., Hofmann, E.E., Lipp, E., Osterhaus, A.D.M.E., Overstreet, R., Porter, J.W., Smith, G.W., & Vasta, G.R. 1999. Emerging marine diseases - climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285: 1505–1510.
- Hasan, M.R., Hecht, T., De Silva, S.S. & Tacon, A.D.J. 2007. Study and analysis of feeds and fertilizers for sustainable aquaculture development. FAO Fisheries Technical Paper No. 497. Rome, FAO. 512 pp.
- Hernandez, C., Ulloa, P.J., Vergara O.J.A., Espejo, R. & Cabello, F. 2005. Infecciones por *Vibrio parahaemolyticus* e intoxicaciones por algas: problemas emergentes de salud pública en Chile. *Revista Médica Chile*, 133: 1081–1088.
- Hõ, Thu L. 2008. Adapting to global warming. Outlook, Viet Nam News Monthly Publication, 51 (March 2008): 8–11.
- Hofmann, E., Ford, S., Powell, E. & Klinck, J. 2001. Modelling studies of the effect of climate variability on MSX disease in eastern oyster (*Crassostrea virginica*) populations. *Hydrobiologia*, 460: 195–212.
- Houtman, R. 2007. Global food security in a changing environment. Paper presented at: A Forum on Innovation for Sustainable Rural Development, Second World Congress on Agricultural and Rural Finance, November 2007, Bangkok.
- Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B.C., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B. & Roughgarden, J. 2003. Climate change, human impacts and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929–934.
- Huijbregts, M.A.J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hungerbühler, K. & Hendriks, A.J. 2007. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological Economics*, 64: 798–807.

- Hunter, B.J. & Roberts, D.C.K. 2000. Potential impacts of the fat composition of farmed fish on human health. *Nutrition Research*, 20: 1047–1058.
- IPCC. 2002. Climate change and biodiversity. In H. Gitay, A. Suarez, R.T. Watson, D.J. Dokken, eds. IPCC Technical Paper V, 76 pp. Inter-Governmental Panel on Climate Change, WMO and UNEP.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: synthesis report. Inter-Governmental Panel on Climate Change. (Also available at www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4-syr-topic/pdf/.)
- Jackson, A. 2006. The importance of fishmeal and fish oil in aquaculture. *International Aquafeed* November-December 2006: 16–19.
- Jaksic, F.M. 2001. Ecological effects of El Niño in terrestrial ecosystems of western South America. *Ecography*, 24 (3): 241–250.
- Jallow, B.P., Barrow, M.K.A. & Leatherman, S.P. 1996. Vulnerability of the coastal zone of The Gambia to sea level rise and development of response strategies and adaptation options. *Climate Research*, 6: 165–177.
- Jobling, M. 1997. Temperature and growth: modulation of growth rate via temperature change. In C.M. Wood, & D.G. McDonald, eds. Global warming: implications for fresh water and marine fish, pp. 225–253. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Jobling, M. 2003. Do changes in Atlantic salmon, *Salmo salar*, fillet fatty acids following a dietary switch represent wash-out or dilution? Test of a dilution model and its application. *Aquaculture Research*, 34: 1215–1221.
- Jobling, M. 2004. “Finishing” feeds for carnivorous fish and the fatty acid dilution model. *Aquaculture Research*, 35: 706–709.
- Jonsson, B. & Jonsson, N. 2006. Cultured Atlantic salmon in nature: a review of their ecology and interaction with wild fish. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 1162–1181.
- Jørstad, K.E., van der Meeren, T., Paulsen, O.N., Thomsen, T., Thorsen, T. & Svåsand, T. 2008. “Escapes” of eggs from farmed cod spawning in net pens: recruitment to wild stocks. *Reviews in Fisheries Science*, 16: 2 pp.
- Kerr, R. 2006. Global warming is changing the world. *Science*, 316: 188–192.
- Kongkeo, H. (in press). The role of backyard hatcheries in shrimp farming in Thailand. In S.S. De Silva & F.B. Davy, eds. Success stories in aquaculture: an Asian perspective, NACA, Bangkok.
- Krkošek, M., Ford, J.S., Morton, A., Lele, S., Myers, R.A. & Lewis, M.A. 2008. Declining wild salmon populations in relation to parasites from farm salmon. *Science*, 318: 1772–1773.
- Kurien, J. 2005. Responsible fish trade and food security. Rome. FAO. FAO Fisheries Technical Paper No. 456: 102 pp.
- Laurenti, G. 2007. Fish and fishery products. World apparent consumption statistics based on food balance sheets. FAO Fisheries Circular. No. 821, Revision 8. Rome, FAO.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623–1627.
- Lean, G. 2006. Cow ‘emissions’ more damaging to planet than CO₂ from cars. UK. The Independent, Sunday 10 December: 1 pp.
- Leary, R.F., Allendorf, F.W. & Forbes, S.H. 1993. Conservation genetics of bull trout in the Columbia and Klamath River drainages. *Conservation Biology*, 7: 856–865.
- Lomborg, B. 2001. *The sceptical environmentalist: measuring the real state of the world*. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 511 pp.
- Luam Kong, A. 2002. Impact of climate change on Caribbean fisheries resources: research needs. Caribbean food systems: Developing a research agenda, 19–20 September 2002, St. Augustine, Trinidad. Global Environmental Change and Food Systems (GECAFS).
- Macedo, I., Verde, M.L. & Azevedo, J. 2004. Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. Government of the State of São Paulo and Secretariat of the Environment, Brazil.

- Mahon, R.** 2002. Adaptation of fisheries and fishing communities to the impacts of climate change in the CARICOM region: Issue paper-draft, mainstream adaptation to climate change (MACC) of the Caribbean Center for Climate Change (CCCC), Organization of American States, Washington. (Also available at www.oas.org/macc/bibliography.htm)
- Marcogliese, D.J.** 2001. Implications of climate change for parasitism of animals in the aquatic environment. *Canadian Journal of Zoology*, 79: 1331–1352.
- McManus, J.W., Reyes, R.B.J. & Nanola, C.L.J.** 1997. Effects of some destructive fishing methods on coral cover and potential rates of recovery. *Environmental Management*, 21: 69–78.
- McMichael, A.J.** 2001. Impact of climatic and other environmental changes on food production and population health in the coming decades. *Proceedings of the Nutrition Society*, 60: 195–201.
- McMichael, A.J.** 2003. Climate change and human health risks. Geneva. World Health Organization. 322 pp.
- Menoyo, D., Izquierdo, M.S., Robaina, L., Ginés, R., Lopez-Bote, C.J. & Bautista, J.M.** 2004. Adaptation of lipid metabolism, tissue composition and flesh quality in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) to the replacement of dietary fish oil by linseed and soyabean oils. *British Journal of Nutrition*, 92: 41–52.
- Miao, W.** (in press). Recent development of rice-fish culture in China – a holistic approach to livelihood improvement in rural areas. In S.S. De Silva & F.B. Davy, (eds) Success stories in aquaculture: an Asian perspective, NACA, Bangkok. In press.
- Miller, J.B.** 2008. Sources, sinks and seasons. *Nature*, 451: 26–27.
- Morales, V.V.Q. & Morales, R.R.** 2006. Regional review on aquaculture development 1. Latin America and the Caribbean - 2005. Rome. FAO Fisheries Circular, F1017/1. 177 pp. FAO.
- Mourete, G., Good, J.E. & Bell, J.G.** 2005. Partial substitution of fish oil with rapeseed, linseed and olive oils in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.): effects on flesh fatty acid composition, plasma prostaglandins E2 and F2, immune function and effectiveness of a fish oil finishing diet. *Aquaculture Nutrition*, 11: 25–40.
- Mous, P.J., Pet-Soede, L., Erdmann, M., Cesar, H.S.J., Sadovy, Y. & Pet, J.S.** 2000. Cyanide fishing on Indonesian coral reefs for the live food fish market - what is the problem? *SPC Live Reef Fish Information Bulletin*, 7: 20-27.
- Mungkung, R.** 2005. Shrimp aquaculture in Thailand: application of life cycle assessment to support sustainable development. Guilford, UK. Centre for Environmental Strategy (CES), School of Engineering, University of Surrey. 360 p. (Ph.D thesis.)
- Mungkung, R., Gheewala, S.H., Prasertsun, P., Poovaroodom, N. & Dampin, N.** 2007. Application of life cycle assessment for participatory environmental management along the supply chain of individual quick frozen Pacific white-leg shrimp (*Penaeus vannamei*). Technical report (in Thai) submitted to Thailand Research Fund.
- Mungkung, R. & Gheewala, S.H.** 2007. Use of life cycle assessment (LCA) to compare the environmental impacts of aquaculture and agri-food products. In D.M. Bartley, C. Brugère, D. Soto, P. Gerber, B. Harvey, (eds) Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. Rome. FAO. FAO Fisheries Proceedings, No 10: 87–96.
- Naylor, R.L., Goldburg, R.J., Mooney H., Beveridge, M., Clay, J., Folke, C., Kautsky, N., Lubchenco, J., Primavera, J. & Williams, M.** 1998. Nature's subsidies to shrimp and salmon farming. *Science*, 282: 883–884.
- Naylor, R.L., Goldburg, R.J., Primavera, J., Kautsky, N., Beveridge, M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. & Troell, M.** 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405: 1097–1024.
- Naylor, R.L., Liska, A.J., Burke, M.B., Falcon, W.P., Gaskell, J.C. Rozelle, S.D. & Cassman, K.G.** 2006. The ripple effect. Biofuels, food security, and the environment. *Environment*, 49: 32–43.

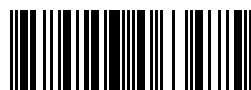
- Nguyen, K.C. 2008. Surviving the flood. Outlook, Viet Nam News Monthly Publication, 51 (March 2008), 14–16.
- Nguyen, T.T.T. & De Silva, S.S. 2006. Fresh water finfish biodiversity and conservation: an Asian perspective. *Biodiversity and Conservation*, 15: 3543–3568.
- Nguyen, V. & Hoang. 2007. Viet Nam's catfish and marine shrimp production: an example of growth and sustainability issues. *Aquaculture Asia-Pacific*, 3 (4): 36–39.
- Nunn, A.D., Harvey, J.P., Britton, J.R., Frear, P.A. & Cowx, I.G. 2007. Fish, climate and Gulf Stream: the influence of abiotic factors on the recruitment success of cyprinid fishes in lowland rivers. *Fresh water Biology*, 52: 1576–1586.
- Olsen, R.E., Suontama, J., Langmyhr, E., Mundheim, H., Ringø, E., Melle, W., Malde, M.K. & Hemre, G.-I. 2006. The replacement of fishmeal with Antarctic krill, *Euphausia superba* in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture Nutrition*, 12: 280–290.
- Paris-Mancilla, E. 2005. Intoxicación Por *Vibrio Parahaemolyticus*. *Cuad Méd Soc (Chile)*, 45: 43–47.
- Parry, M.L., Rosenweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. & Fischer, G. 2004. Effect of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14: 53–67. Patz, J.A. 2000. Climate change and health: new research and challenges. *Ecosystem Health*, 6: 52–58.
- Pawiro, S. 2005. Trends in major Asian markets for live grouper. INFOFISH International, 4/99: 20–24.
- Peperzak, L. 2003. Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica*, 24: S139–S144. Pradhan, B.R. 1987. Inland fisheries project, Indrasarobar Kulekhani, Nepal. Annual progress report (2003/04), Fisheries Development Division, Ministry of Agriculture, HMG Nepal.
- Pike, I.H. & Barlow, S.M. 2002. Impacts of fish farming on fish, Bordeaux Aquaculture and Environment Symposium. Bordeaux, France.
(Available at www.iffco.org/tech/bordeau.htm.)
- Primavera, J.H. 1998. Tropical shrimp farming and its sustainability. In S.S. De Silva (ed.) *Tropical mariculture*, London. Academic press. pp. 257–289.
- Primavera, J.H. 2005. Mangroves, fishponds, and the quest for sustainability. *Science*, 310: 57–60.
- Rhymer, J.M. & Simberloff, D. 1996. Extinction by hybridisation and introgression. *Annual Review Ecological Systematics*, 27: 83–109.
- Roessig, J.M., Woodley, C.M., Cech, J.J. & Hansen, L.J. 2004. Effects of global climate change on marine and estuarine fish and fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14: 251–274.
- Rombough, P.T. 1997. The effects of temperature on embryonic and larval development. In C.M. Wood & D.G. McDonald, eds. *Global warming: implications for fresh water and marine fish*. pp. 177–223. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Rosenberg, A.A. 2008. The price of lice. *Nature*, 451/3: 23–24.
- Rungruangsak-Torrissen, K. 2002. Wild salmon should not be threatened by healthy and non-genetically manipulated escapees. ICES CM 2002/ T:07. 16 pp.
- Scales, H., Balmford, A. & Manica, A. 2007. Monitoring the live reef food fish trade: lessons learned from local and global perspectives. *SPC Live Reef Fish Information Bulletin*, 17: 36–44.
- Schmittner, A. 2005. Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation. *Nature*, 434: 628–633.
- Secretan, P.A.D., Bueno, P.B., van Anrooy, R., Siar, S.V. Olofsson, A., Bondad-Reantaso, M.G. & Funge-Smith, S. 2007. Guidelines to meet insurance and other risk management needs in developing aquaculture in Asia. Rome, FAO. FAO Fisheries Technical Paper, No. 496, 148 pp.

- Sen, A. 1981. Poverty and famines: an essay on entitlement and deprivation. Oxford, UK. Clarendon.
- Sharp, G.D. 2003. Future climatic change and regional fisheries: a collaborative analysis. Rome. FAO. FAO Fisheries Technical Paper, No. 452: 75 pp.
- Smayda, T.J. 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence of a global epidemic. In E. Graneli, B. Sunderstroem, L. Edler, D.M. Anderson, (eds). Toxic Marine Phytoplankton, pp. 29–41. Holland, Elsevier.
- Snieszko, S.F. 1974. The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. *Journal of Fish Biology*, 6 (2): 197–208.
- Soto, D., Jara, F. & Moreno, C. 2001. Escaped salmon in the inner seas, southern Chile: facing ecological and social conflicts. *Ecological Applications*, 11 (6): 1750–1762.
- Soto, D., Arismendi, I., Gonzalez, J., Guzman, E., Sanzana, J., Jara, F., Jara, C. & Lara, A. 2006. Southern Chile, trout and salmon country: invasion patterns and threats for native species. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79: 97–117.
- Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Brugère, C., Angel, D., Bailey, C., Black, K., Edwards, P., Costa Pierce, B., Chopin, T., Deudero, S., Freeman, S., Hambrey, J., Hishamunda, N., Knowler, D., Silver, W., Marba, N., Mathe, S., Norambuena, R., Simard, F., Tett, P., Troell, M. & Wainberg, A. 2008. Applying an ecosystem-based approach to aquaculture: principles, scales and some management measures. In D. Soto, J. Aguilar-Manjarrez & N. Hishamunda, (eds). Building an ecosystem approach to aquaculture. FAO/Universitat de les Illes Balears Expert Workshop. 7–11 May 2007, Spain, Mallorca. FAO Fisheries Proceedings. No. 14. Rome, FAO. pp.15–35.
- Stansby, M.E. 1990. Nutritional properties of fish oil for human consumption - modern aspects. In M. E. Stansby, ed. Fish Oils in Nutrition, pp. 289–308. New York, NY, USA. Van Nostrand Reinhold.
- Sugiyama, S., Staples, D. & Funge-Smith, S. 2004. Status and potential of fisheries and aquaculture in Asia and the Pacific. RAP Publication 2004/25. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok. 53 pp.
- Suontama, J., Kiessling, A., Melle, W., Waagbø, R. & Olsen, R.E. 2007. Protein from Northern krill (*Thysanoessa inermis*), Antarctic krill (*Euphausia superba*) and the Arctic amphipod (*Themisto libellula*) can partially replace fishmeal in diets to Atlantic salmon (*Salmo salar*) without affecting product quality. *Aquaculture Nutrition*, 13: 50–58.
- Swing, T.G. 2003. What future for the oceans? New York, USA. Foreign Affairs September–October: pp.139–52.
- Tacon, A.D.J., Hasan, M.R. & Subasinghe, R.P. 2006. Use of fishery resources as feed inputs for aquaculture development: trends and policy implications. FAO Fisheries Circular. No. 1018. Rome, FAO. 99 pp.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., Siqueira, M.F.D., Grainger, A. & Hannah, L. 2004. Extinction risks from climate. *Nature* 427: 145–48.
- Thorstad, E.B., Fleming, I.A., McGinnity, P., Soto, D., Wennevik, V. & Whoriskey, F. 2008. Incidence and impacts of escaped farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in nature. NINA Special Report 36. 110 pp.
(Also available at <ftp://ftp.fao.org/FI/DOCUMENT/aquaculture/aj272e00.pdf>.)
- Troell, M., Tyedmers, P., Kautsky, N. & Rönnbäck, P. 2004. Aquaculture and energy use. In C. Cleaveland, ed. Encyclopaedia of Energy, pp. 97–108. Amsterdam, Elsevier.
- Turchini, G.M. & De Silva, S.S. 2008. Bio-economical and ethical impacts of alien finfish culture in European inland waters. Aquaculture International, available online DOI 10.1007/s10499-007-9141-y. 33 pp.
- Turchini, G.M., Francis, D.S. & De Silva, S.S. 2007. Finishing diets stimulate compensatory growth: results of a study on Murray cod, *Maccullochella peelii peelii*. *Aquaculture Nutrition*, 13: 351–360.

- Tyedmers, P. & Pelletier, N.** 2007. Biophysical accounting in aquaculture: insights from current practice and the need for methodological development. In D.M. Bartley, C. Brugère, D. Soto, P. Gerber & B. Harvey, (eds). Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. FAO. Rome. FAO Fisheries Proceedings No 10, 229-241.
- Ulbricht, T.L.V. & Southgate, D.A.T.** 1991. Coronary heart disease: seven dietary factors. *The Lancet*, 338: 985–992.
- UNEP.** 1987. Our Common Future. The World Commission on Environment and Development, Commission for the Future. Geneva.
- Van Dam, A.A., Beveridge, M.C.M., Azim, M.C. & Verdegem, M.C.J.** 2002. The potential of fish production based on periphyton. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12: 1–31.
- Van der Kraak, G. & Pankhurst, N.W.** 1997. Temperature effects on the reproductive performance of fish. In C.M. Wood & D.G. McDonald, eds. Global warming: implications for fresh water and marine fish, pp. 159–176. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Verdegem, M.C.J., Bosma, R.H. & Verreth, J.A.V.** 2006. Reducing water use for animal production through aquaculture. *Water Resources Development*, 22: 101–113.
- Vinh Hoan Corporation.** Undated. Ten developing years. Vinh Hoan Corporation, National Road 30, Ward 11, Cao Lanh City, Dong Tap Province, Viet Nam.
- Wagle, S.K., Gurung, T.B., Bista, J.D. & Rai, A.K.** 2007. Cage fish culture and fisheries for food security and livelihoods in mid hill lakes of Pokhara Valley, Nepal: post community based management adoption. *Aquaculture Asia*, XII (3): 21–27.
- Wahab, M.A., Azim, M.E., Ali, M.H., Beveridge, M.C.M. & Kahn, S.** 1999. The potential of periphyton based culture of the native major carp calbaush, *Labeo clabasu* (Hamilton). *Aquaculture Research*, 30: 409–419.
- Waples, R.S.** 1991. Genetic interactions between hatchery and wild salmonids: lessons from the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48: 124–133.
- 2WE Associate Consulting.** 2000. Aquaculture and climate change in Canada. A discussion paper. Canada, Victoria, BC. 11 pp.
(Also available at www.cisc.univ.ca/workshop/Aquaculture&climate-in-Cda.htm)
- Wood, C.M. & McDonald, D.G.** 1997. *Global warming: implications for fresh water and marine fish*. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 425 pp.
- WFC.** 2006. The threat to fisheries and aquaculture from climate change. Penang. WFC. World Fish Center Policy Brief: 8 pp.
- WFC.** 2007. Fisheries and aquaculture can provide solutions to cope with climate change. Penang. World Fish Center. WFC Brief, 1701: 4pp.
- Worldwatch Institute.** 2006. Biofuels for transportation: global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the twenty-first century. Washington, DC.
- Williams, M.** 2004. World fish supplies, outlook and food security. In A.G. Brown (ed.) Fish, aquaculture and food security. Sustaining fish as a food supply: pp. 3–12. Australia, Victoria. The ATSE Crawford Fund.
- Wyban, J.** 2007. Thailand's shrimp revolution. *Aquaculture Asia-Pacific Magazine*, May–June 2007: 15–18.
- Zimmer, D. & Renault, D.** 2003. Virtual water in food production and global trade. Review of methodological issues and preliminary results.
(available at www.NWW.hydroaid.it/FTP/Data_Research/D.%20Zimmer%20et%20al-virtual%20water.pdf).
- Zwiers, F.W. & Weaver, A.J.** 2000. The causes of the twentieth century warming. *Science*, 290: 2081–2083.

Esta publicación ofrece una visión de conjunto del conocimiento científico actualmente disponible sobre las consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura. El documento contiene tres estudios técnicos que fueron presentados y debatidos en el Taller de expertos de la FAO «Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura» (Roma, 7-9 de abril de 2008). Un resumen de los resultados del taller y los mensajes clave relacionados con las repercusiones del cambio climático en los ecosistemas acuáticos y en los medios de vida basados en la pesca y la acuicultura se presentan en la introducción. El primer estudio aborda la variabilidad y el cambio climático y sus consecuencias físicas y ecológicas para los ambientes marinos y de aguas dulces. El segundo se ocupa de las repercusiones del cambio climático en los pescadores y comunidades pesqueras y examina las medidas de adaptación y mitigación que podrían ponerse en ejecución. Por último, el tercer estudio examina de manera específica las repercusiones del cambio climático en la acuicultura y propone las posibles medidas de adaptación y mitigación.

ISBN 978-92-5-306347-5 ISSN 2070-7037



9 7 8 9 2 5 3 0 6 3 4 7 5

I0994S/1/11.11