

Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá



MinAgricultura
Ministerio de Agricultura
y Desarrollo Rural

100 AÑOS

Elaborado por:
César Andrés Cortés Bello.
Coordinador del proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302.

Juan Geovany Bernal Patiño
Eliecer David Díaz Almanza
Javier Fernando Méndez Monroy
Consultores nacionales TCP/COL/3302

Supervisión técnica:
Pasquale Steduto (FAO/NRL)
Patricia Mejías (FAO/NRL)
Dirk Raes (KU Leuven)
Elias Fereres (Universidad de Córdoba)
José Francisco Boshell (Consultor)

La presente investigación se desarrolló en el marco del proyecto de cooperación técnica TCP/COL/3302.

“Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático (EIECC)”.

Fotografías: FAO Colombia.

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 este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN I34285/1/08.13

La FAO fomenta el uso, la reproducción y la difusión del material contenido en este producto informativo. Salvo que se indique lo contrario, se podrá copiar, imprimir y descargar el material con fines de estudio privado, investigación y docencia, o para su uso en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca de forma adecuada a la FAO como la fuente y titular de los derechos de autor y que ello no implique en modo alguno que la FAO aprueba los puntos de vista, productos o servicios de los usuarios.

Todas las solicitudes relativas a la traducción y los derechos de adaptación así como a la reventa y otros derechos de uso comercial deberán dirigirse a www.fao.org/contact-us/licence-request o a copyright@fao.org.

Los productos de información de la FAO están disponibles en el sitio web de la Organización (www.fao.org/publications) y pueden adquirirse mediante solicitud por correo electrónico a publications-sales@fao.org.

© FAO 2013

AGRADECIMIENTOS

La realización del presente TCP/COL/3302 “Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático (EIECC)” y su publicación fue posible gracias a la suma de varios esfuerzos y voluntades.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), brindaron apoyo técnico y financiamiento para la realización del TCP/COL/3302 y edición del presente trabajo.

Adicionalmente, los aportes del Departamento Nacional de Planeación (DNP), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Federación Nacional de Usuarios de Distritos de Adecuación de Tierras (FEDERRIEGO).

Se resalta los grandes aportes de Pasquale Steduto, Patricia Mejías, Dirk Raes, Elias Fereres, Juan Fernando Gallego Beltrán, Nestor Hernandez Iglesias, Francisco Boshell, Ana Maria Loboguerrero, Fabián Villalba, Miguel Ayarza, Cesar Terán, Jaime Humberto Bernal Riobo y Pedro Porras.

A todas ellas y ellos que contribuyeron al logro del presente trabajo, nuestro sincero agradecimiento.





PRESENTACIÓN

La división de Tierras y Agua de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) ha desarrollado un modelo que permite simular el rendimiento de cultivos herbáceos como respuesta al agua, denominado AquaCrop. Este modelo es el resultado de múltiples investigaciones a nivel mundial y se tienen experiencias de la adaptación y calibración exitosa en lugares con diferentes condiciones medio-ambientales y características propias de los cultivos.

Atendiendo la demanda técnica de la Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible del Departamento Nacional de Planeación (DNP) a la FAO, se crea el Convenio de Cooperación Técnica TCP/COL/3302. El propósito del convenio fue adaptar y validar AquaCrop para los cultivos de arroz riego, caña de azúcar, maíz tecnificado y papa en zonas productoras a nivel nacional. Adicionalmente, se evaluó la productividad de los cultivos bajo escenarios de variabilidad y cambio climático.

Los resultados de las actividades anteriores permitirán a DNP utilizar el modelo AquaCrop en el Estudio de Impacto Económico de Cambio Climático (EIECC) a nivel nacional y a los gremios, centros de investigación, productores, técnicos agrícolas, entre otros, como herramienta para la toma de decisiones.

El desarrollo del TCP contó con presupuesto de FAO y de gobierno nacional a través de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Los recursos destinados por MADR para la ejecución de este proyecto fueron administrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), quien a su vez suministró información climática y meteorológica necesaria para la adaptación de AquaCrop.

En este documento se presentan resultados obtenidos de la adaptación y validación del modelo AquaCrop a las condiciones agrometeorológicas de zonas productoras de Colombia y los posibles efectos de variabilidad y cambio climático sobre los rendimientos agrícolas de la papa.





TABLA DE SIGLAS

CC	Canopy Cover o Cobertura de follaje
CCo	Canopy Cover o Cobertura de follaje inicial
CORPOICA	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EIECC	Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático
ENSO	El Niño/Oscilación del sur (siglas en inglés)
ETo	Evapotranspiración de referencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (siglas en inglés)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HI	Índice de Cosecha (siglas en inglés)
IAF	Índice de Área Foliar
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en inglés)
MADR	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
MCG	Modelos de circulación general de la atmósfera
NOAA	Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (siglas en inglés)
ONI	Índice Oceánico del Niño (siglas en inglés)
RAW	Lámina de agua rápidamente aprovechable (siglas en inglés)
SRES	Reporte Especial sobre Escenarios de emisiones (siglas en inglés)
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical





CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
2.	Aspectos Generales.....	3
2.1.	Cultivo de la papa.....	3
2.2.	Fenómenos climáticos.....	5
2.2.1.	La Variabilidad climática.....	5
2.2.2.	El Cambio Climático.....	6
2.3.	Descripción del modelo AquaCrop.....	9
3.	Descripción de la metodología.....	13
3.1.	Información climática de la zona de estudio.....	14
3.2.	Descripción de módulos y parámetros a implementar.....	16
3.3.	Adaptación del modelo de AquaCrop.....	17
3.4.	Análisis de Sensibilidad.....	20
3.5.	Validación de AquaCrop.....	20
3.6.	Aplicación de AquaCrop.....	21
3.6.1.	Escenarios de variabilidad climática.....	21
3.6.2.	Escenarios de cambio climático.....	22
4.	Resultados.....	23
4.1.	Análisis agroclimático.....	23
4.2.	Ajuste del modelo.....	25
4.3.	Análisis de sensibilidad.....	36
4.3.1.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes aplicaciones de riego.....	30
4.3.2.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles freáticos.....	33
4.3.3.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de fertilidad de suelos.....	34
4.3.4.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de profundidad de horizontes restrictivos.....	37
4.3.5.	Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas de suelo.....	39





4.4.	Validación.....	39
4.5.	Simulación de escenarios de Variabilidad y Cambio Climático.....	40
4.5.1.	Posibles efectos de la variabilidad climática sobre la papa.....	40
4.5.2.	Posibles efectos del cambio climático sobre la papa.....	43
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	47
	Anexo.....	50

1. INTRODUCCIÓN

Colombia está experimentando actualmente constantes cambios en sus modelos sociales, políticos y económicos. El país se encuentra en un punto en el que debe tomar decisiones que determinarán el tipo de desarrollo que su sociedad seguirá en el futuro y en esa medida serán cruciales a la hora de mejorar las condiciones de vida de su población. En particular, en el campo de la agricultura, Colombia enfrenta una serie de importantes desafíos, que deben ser afrontados apropiadamente. Actualmente se evidencia en el territorio nacional ciertas modificaciones en los regímenes climáticos (precipitación y temperatura), reflejo de fenómenos globales y de las particularidades de la geografía colombiana, los cuales han tenido repercusiones sobre la producción de algunos cultivos agrícolas. Es entonces importante que se implementen estrategias y se usen herramientas que faciliten la adaptación de la agricultura colombiana a los cambios que está experimentando y seguirá experimentando el clima en el futuro.

De acuerdo a lo anterior, el documento que aquí se presenta se enmarca dentro de las actividades de MADR junto con DNP y FAO para apoyar y fortalecer acciones que conlleven a evaluar impactos económicos del cambio climático en la agricultura a través de la adaptación y calibración del modelo AquaCrop para el cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. De esta manera se determinan rendimientos agrícolas a través de características de la zona de siembra, tales como suelo, clima, cultivo y prácticas de manejo, y se aportan herramientas para mejorar y tomar decisiones para el uso eficiente de los recursos medioambientales, y también contar con elementos adecuados para enfrentar fenómenos de variabilidad y cambio climático.

AquaCrop es un modelo de desarrollo de follaje, enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible (Raes *et al*, 2009). AquaCrop es desarrollado por la FAO, con la ventaja de ser relativamente sencillo en comparación con otros modelos de simulación de rendimientos, por lo que con sólo calibrar algunos parámetros se obtienen resultados similares a los medidos en campo. Esto facilita el uso del modelo en tanto que la información necesaria para adaptarlo a las condiciones colombianas no es tan numerosa en comparación a otros modelos y la plataforma del software resulta ser de fácil manejo. De esta forma, además de contribuir al EIECC, el TCP deja capacidad instalada en gremios, instituciones, centros de investigación y algunos productores para tomar decisiones haciendo uso de esta herramienta.





En este orden de ideas, este documento expone resultados del proceso de adaptación y calibración del modelo AquaCrop a las condiciones y características propias de zonas productoras de Colombia del cultivo de papa. Este cultivo se produce aproximadamente en 250 municipios colombianos, siendo Cundinamarca y Boyacá los departamentos que registran la mayor producción, representando cada uno el 39.3% y el 27.3% de la producción nacional (Núñez, 2011). Siendo consecuentes con lo anterior, la adaptación del modelo al cultivo se llevó a cabo en estos dos departamentos, para lo cual se contó con información proporcionada por IDEAM, así como estudios secundarios (Santos & Segura, 2005).

Adicionalmente en este documento, se presentan análisis de sensibilidad de algunos parámetros de AquaCrop y ejercicios para identificar cambios en el rendimiento agrícola en función de la variabilidad climática y de los niveles de CO₂ estimados para el futuro.

El documento se encuentra compuesto por cinco secciones, siendo la primera esta introducción. En la segunda sección se presentan generalidades del modelo AquaCrop y del cultivo de papa, así como una descripción general de los fenómenos de variabilidad y cambio climático; la tercera sección contiene la descripción de la metodología utilizada respecto al estudio de caso, la adaptación y aplicación del modelo. La cuarta sección presenta los resultados obtenidos con el modelo y en la quinta sección se encuentran las conclusiones y recomendaciones del proceso de ajuste del modelo.

2. ASPECTOS GENERALES

2.1. Cultivo de la papa

La papa pertenece a la familia de las Solanáceas y su producción se concentra en ecosistemas de montaña de clima frío, entre los 2500 - 3000 m.s.n.m. Las variedades conocidas como “papa de año” en Colombia, corresponden a *Solanum Tuberosum* L. subespecie Andígena, y la variedad criolla pertenece a la especie *Solanum Phureja* (Rojas, 2011). Según FAO (2008), citado por Rojas (2011), el cultivo de la papa ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en importancia como alimento.

El período de crecimiento de la papa varía de acuerdo con la variedad. De esta manera variedades como Parda Pastusa, Pastusa Suprema y Diacol Capiro (R12) tienen un periodo de cultivo alrededor de los seis (6) meses, en tanto para la papa criolla es de alrededor de cuatro (4) meses.

El rendimiento del cultivo de papa se ve influenciado por condiciones climáticas de variabilidad tanto intranuales (ZCIT) como interanuales (ENSO). Además de esto se suman las prácticas de manejo agrícola (riego, fertilización, mecanización, preparación de suelos), la edafología y los aspectos agronómicos propios del cultivo (genotipo, fisiología, fenología, entre otros).

En el caso de suelos, las condiciones óptimas para el desarrollo de este cultivo son texturas francas, franco-arenosas, bien aireados con buena fertilidad, ricos en materia orgánica y con pH entre 5 y 6.2.

Corchuelo (2005) indica que la temperatura foliar óptima para fotosíntesis en el cultivo de la papa es bastante amplia y oscila entre 18 °C y 24 °C. Cabe mencionar que temperaturas de enfriamiento (2 °C) y congelamiento ocasionan descenso en la tasa fotosintética y tiene efectos nocivos en el crecimiento de la papa, en las relaciones hídricas y en los procesos de translocación y asignación del carbono (Corchuelo, 2005).

En relación con la variable agua, la exposición del cultivo de la papa a estrés hídrico causa reducción del potencial de rendimiento, disminuyendo tanto la interceptación de la radiación solar como la eficiencia fotosintética del follaje. Resultado del estrés de agua durante el desarrollo vegetativo, el área de las hojas de la planta se reduce, como también el número





de hojas por planta debido a restricciones en las tasas de exposición foliar. Aun más, la sequía induce la prematura senescencia foliar (Corchuelo, 2005). Las necesidades hídricas se pueden suplir por medio de la precipitación y con la aplicación de riego.

En relación con el cultivo de la papa en Colombia, el Consejo Nacional de la Papa estima que para el año 2010 se presentaba un total de 138.631 ha de área sembrada, con producción de 2'652.449 t*año⁻¹, distribuida principalmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Nariño (Ñústez, 2011), con los dos primeros representando más del 50% del área cultivada.

Las regiones paperas de Colombia ubicadas en clima frío, muy frío y sub-páramo presentan 68% del área con cobertura de ceniza volcánica en diferente grado de meteorización. El 32% restante, en superficies sin influencia de ceniza, bien porque no se produjo la depositación o porque se perdió por procesos de erosión, (Castro 2003 citado por Castro, 2005). Por tal razón, los costos de fertilización para la producción de este cultivo, son aproximadamente el 20% de los totales, debido a correcciones que se deben hacer para que las plantas se desarrollen de manera óptima (CCI-MADR, 2010).

Las zonas productoras de papa en Colombia se encuentran ubicadas principalmente en la zona andina, donde se presenta régimen bimodal de lluvias debido al tránsito de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Por tal razón se registran dos épocas de siembra, una en cada semestre del año.

Particularmente, la práctica de manejo de riego en Colombia, según la Encuesta Nacional Agropecuaria (DANE, 2011), para el cultivo de papa indica que de 64.260 ha, censadas, aproximadamente, para el segundo semestre de 2011, sólo 2.622 ha están bajo alguna tecnología de riego, es decir, alrededor del 4%, de las cuales 56 ha se encuentra en goteo, 2.212 ha en aspersión, 48 ha con riego por gravedad, y las restantes 306 ha se irrigan de forma artesanal.

En el caso del nivel tecnológico del cultivo de la papa se indica que un área de 20.515 ha (35%) realizan manualmente las prácticas, es decir, siembra, aporque y cosecha, y 38.272 ha (65%) tienen algún grado de mecanización en alguna de estas actividades (MAVDT, 2004).

Para los departamentos del altiplano cundiboyacense se reporta producción promedio de tubérculo de 19 t*ha⁻¹ (Ñústez, 2011), pero se presentan diferencias dependiendo el semestre del año en el cual se cosecha el producto. Para el año 2011 el DANE (2011) reporta para Cundinamarca, rendimientos de 17.9 t*ha⁻¹ y 19.4 t*ha⁻¹ para el primer y segundo semestre, respetivamente, y para Boyacá valores de producción de tubérculo de 15.1 t*ha⁻¹ y 20.9 t*ha⁻¹, para semestre A (primero) y B (segundo), respectivamente. Los anteriores valores se reportan bajo el modelo de producción agrícola que se sigue en el altiplano cundiboyacense; pero bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua, fertilización y prácticas agrícolas

las producciones potenciales de tubérculo pueden ser superiores a las 30 t*ha⁻¹ para la variedad Diacol Capiro y las 45 t*ha⁻¹ para Pastusa Suprema.

Esta variación en los rendimientos del cultivo de papa están en función de las prácticas de manejo de cultivo, épocas de siembra, materiales sembrados y de la disponibilidad de radiación solar, agua y nutrientes durante el ciclo de la planta, así como del régimen térmico de la zona. Por lo tanto, el uso de una herramienta de simulación de rendimiento agronómico del cultivo en función de variables meteorológicas y parámetros propios de las plantas, suelos y prácticas de manejo características de cada zona productora del país, hacen que el modelo AquaCrop, sea de utilidad, ya que nos ayuda a la toma de decisiones, en el momento de diseñar estrategias, de manejo agronómico, uso eficiente al agua, y a su vez de medidas de adaptación ante efectos de variabilidad climática y en el futuro de cambio climático.

2.2. Fenómenos climáticos

A continuación se presenta una descripción general de los fenómenos de variabilidad climática (inter-anual e intra-anual) y cambio climático, junto con los impactos que estos tienen sobre Colombia.

2.2.1. La Variabilidad climática

Según Pabón (2011), la variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones alrededor de una condición predominante (normal climática) observadas durante periodos de tiempo relativamente cortos. Ésta incluye los extremos y las diferencias de los valores mensuales, estacionales y anuales con respecto a los valores promedio (generalmente de series de 30 años de extensión) de la correspondiente variable (por ejemplo, temperatura del aire, precipitación). La variabilidad climática incluye las variaciones intraestacionales (variaciones de dos o tres meses), interanuales (de año en año) e interdecadales (a través de decenios).

En Colombia la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es la principal responsable de la variabilidad climática estacional. La ZCIT es la denominación que se da a un cinturón de baja presión que rodea al globo terrestre en la región ecuatorial formado por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes situadas al Norte y Sur del Ecuador. Esta convergencia de masas de aire húmedas, provoca una intensa actividad convectiva, generando abundante nubosidad, lluvias y tormentas sobre las zonas por donde pasa (IDEAM ,2002 citado por Rojas 2011; IDEAM, 2005).

El fenómeno ENSO (El Niño-Niña Southern Oscillation) es uno de los fenómenos de variabilidad climática inter-anual conocido hasta ahora que tiene gran influencia e impacto en la climatología de algunas regiones colombianas. Sin embargo, ENSO es sólo uno de tantos fenómenos océano-atmosféricos que producen variabilidad. El ENSO es un patrón





climático cuasi periódico que ocurre en la zona ecuatorial del Océano Pacífico, con una escala temporal de 2 a 7 años, los eventos Niño/Niña se reconocen de modo general por alteraciones en la temperatura media superficial del Pacífico Ecuatorial (Pabón D. 2011).

Este fenómeno es importante en la climatología colombiana, ya que afecta los valores de precipitación, temperatura del aire, niveles de radiación, entre otros, ya sea con aumentos ó reducciones respecto de la media climática. Según IDEAM (2005), efectos del fenómeno ENSO - fase Niño, se han identificado sobre las variables temperatura del aire, precipitación y caudales. Se han hecho evidentes ligeros incrementos en la temperatura del aire (entre 0.2 y 0.5 °C) en la mayor parte del país. Estas anomalías superan el medio grado Celsius en la región Pacífica, el nororiente de la región Caribe y buena parte de la región Andina, particularmente en los valles interandinos y en los Santanderes. También se ha podido determinar que durante su ocurrencia se presenta una tendencia significativa a la disminución de la temperatura del aire en horas de la madrugada, con lo cual se propicia el desarrollo del fenómeno de heladas en los altiplanos. En términos generales, se ha podido identificar que cuando se presenta el fenómeno del niño hay déficit moderado de precipitación (entre el 20 y el 40% en los volúmenes mensuales) en la mayor parte de la región Andina, entre ellos Cundinamarca, Valle de Cauca y Tolima y en la región Caribe, aunque la zona del Norte de Córdoba presenta condiciones severas (superiores al 40%).

Bajo condiciones del ENSO, fase Niña, se ha hecho evidente en Colombia el descenso de la temperatura del aire durante las horas del día en la región Pacífica, en gran parte de la región Andina y Caribe. Aumentos en la temperatura del aire solo se han observado en sectores aislados del Piedemonte Llanero. En relación con alteraciones en el patrón pluviométrico del país a causa de esta fase del fenómeno, es importante mencionar los excedentes de precipitación, entre 20 y 40% de los valores normales, que se registran en forma muy localizada en áreas de la región Andina y Caribe. Aunque a nivel muy local, en Cundinamarca, Tolima y Valle del Cauca, se han presentado excedentes severos (mayores del 40%) (Montealegre J. 2009; Montealegre J. 2007).

La variabilidad climática puede afectar el rendimiento de los cultivos cuando se presentan eventos anómalos, esto es, precipitaciones extremas que conlleven por ejemplo a sequías y excesos de humedad. Estas anomalías pueden tener mayor incidencia si sobrepasan el umbral de tolerancia que puede tener el cultivo en alguna fase fenológica específica, conduciéndolo a la reducción del rendimiento o a su muerte total.

2.2.2. El Cambio climático

En la actualidad existe una cierta preocupación por el hecho de que el clima pueda estar cambiando a un ritmo excesivamente rápido en comparación con sus fluctuaciones naturales. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 1996), el incremento de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera, de continuar a

los ritmos actuales de emisión, darán lugar en las próximas décadas a un cambio climático global que se reflejará en distintos fenómenos que alterarán especialmente la temperatura y los regímenes de precipitaciones de nuestro planeta Tierra.

Escenarios de Cambio Climático

Para analizar los diferentes impactos del Cambio Climático y debido a la alta incertidumbre respecto a las condiciones climáticas futuras, el IPCC aconseja trabajar con “escenarios”, los cuales son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro.

Estos escenarios del “posible clima futuro”, son derivados de escenarios de las posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas. Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de supuestos sobre las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero y otros agentes contaminantes, es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones.

En el 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés). Estos nuevos escenarios examinan el período de 1990 al 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos como la población mundial y el producto interno bruto. Los escenarios SRES se han utilizado como base de las proyecciones climáticas de modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) y modelos acoplados. Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas, de cambio tecnológico y están constituidos por cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2 (IPCC, 2000).

- A1: Un mundo con un crecimiento económico muy rápido; población global que alcanza su punto máximo a mediados de siglo y disminuye a partir de entonces. Se presenta una introducción rápida de tecnologías nuevas y más eficientes.
- A2: Un mundo muy heterogéneo con aumento continuo de la población global; con crecimiento económico regionalmente orientado y más fragmentado y más lento que en otros escenarios.
- B1: Un mundo convergente con la misma población global que en A1 pero con cambios rápidos de estructuras económicas hacia una economía de la información y los servicios, con reducciones de intensidad material, y la introducción de tecnologías limpias y eficientes de recursos.
- B2: Un mundo en el cual el énfasis está sobre soluciones locales para la sostenibilidad económica, social, y ambiental, con la población continuamente creciente (menor que en A2) y con un desarrollo económico intermedio.





Cambio Climático y sus posibles impactos en Colombia

El cambio climático representa una seria amenaza para la sociedad colombiana por sus múltiples impactos previstos sobre la población y los sectores productivos. Especialmente el sector agropecuario, debido a que la agricultura es vulnerable al cambio climático, ya que las temperaturas más altas tienen impacto sobre los rendimientos de los cultivos. Los cambios en los patrones de las precipitaciones a corto plazo representarían pérdidas de cosechas, y en el largo plazo, una disminución en la producción. No obstante, es muy probable que el cambio climático también genere ciertos beneficios en algunos cultivos y regiones específicas del mundo.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en cumplimiento de las funciones de informar al Estado y a la comunidad colombiana acerca del ambiente, particularmente sobre el clima, ha venido desarrollando investigaciones para detectar las evidencias del cambio climático en Colombia y para elaborar escenarios climáticos que con mayor probabilidad se presentarían en los próximos decenios.

IDEAM ha proyectado tendencias del clima para Colombia bajo los escenarios del IPCC utilizando modelos meteorológicos globales y regionales de alta resolución: modelo global GSM (Global Spectral Model) del MRI (Meteorological Research Institute) del Japón y los modelos regionales PRECIS (Providing Regional Climates for impact Studies) del Reino Unido y WRF (Weather Research and Forecast) de los Estados Unidos, con base en condiciones iniciales de modelos de baja resolución (CCM3, ECHAM4, HadCM3Q, HadAM3P y CCSM) ofrecidos por centros internacionales como el MRI del Japón, el Centro Hadley del Reino Unido y el Community Climate System Model (CCSM) de los Estados Unidos (Ruiz J, 2010).

Estudios desarrollados por IDEAM (Ruiz J, 2010), reportan que se detectó para Colombia un aumento de la temperatura media del orden de $0.13^{\circ}\text{C} \cdot \text{década}^{-1}$ para 1971-2000 y el ensamble de los escenarios de cambio climático proyecta que la temperatura promedio del aire en el país aumentará con respecto al período de referencia 1971-2000 en 1.4°C para el 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°C para el 2071-2100. Esto causaría disminuciones en los volúmenes de precipitación en amplias zonas de las regiones Caribe y Andina.

El calentamiento de la atmósfera también contribuirá al aumento de la evaporación y de la evapotranspiración con lo que se afecta el ciclo hidrológico, reduciendo así la escorrentía. La reducción de la precipitación en las regiones Andina y Caribe incidirá directamente en la reducción de los caudales y la disminución de los mismos traerá efectos en la calidad del recurso. Con lo anterior, las regiones Caribe y Andina pueden ser objeto de los siguientes impactos: "Desabastecimiento de agua para consumo humano y las actividades que desarrolla la población. Desmejoramiento del saneamiento básico con implicaciones en la salud humana. Incremento de los costos de la provisión de agua y conflictos entre la

población y las entidades encargadas de la gestión de los recursos y de la provisión de agua potable” (Pabón, 2010 citado por Ruiz J, 2010). También es posible que se presenten incrementos hacia la Región Pacífica (Ruiz J, 2010).

2.3. Descripción del modelo AquaCrop

Como se describió en la introducción AquaCrop es un modelo de desarrollo de follaje enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible. El modelo simula los rendimientos posibles de cultivos herbáceos en función del consumo de agua. El modelo se centra en el agua, al ser éste uno de los principales determinantes de la producción agrícola y debido a que el crecimiento de la población y la creciente industrialización alrededor del mundo están demandando una cantidad cada vez mayor de agua, convirtiendo a este recurso finito cada vez más en un factor limitante de la producción agrícola.

Además de simular satisfactoriamente el rendimiento agrícola, AquaCrop es un modelo que utilizando un conjunto reducido de parámetros y principios físicos, logra describir de forma simple y directa los procesos que determinan la producción agrícola del cultivo y de esta manera hace más fácil el manejo del mismo por parte de un público bastante amplio.

En la figura 1 se presenta la interfaz principal de AquaCrop, donde se observan los módulos disponibles para realizar los ejercicios de simulación. En la parte superior, en el encabezado “Environment and Crop”, se encuentran cuatro módulos que componen el modelo: Clima, Cultivo, Prácticas de Manejo y Suelo, (los cuales serán descritos en la próxima sección). Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros (ventana del lado derecho). A continuación se describen brevemente algunos de estos parámetros, los cuales serán objeto de discusión en posteriores secciones (Figura 2). En paréntesis después del nombre del parámetro se encuentra el módulo al cual pertenece cada parámetro en el modelo.



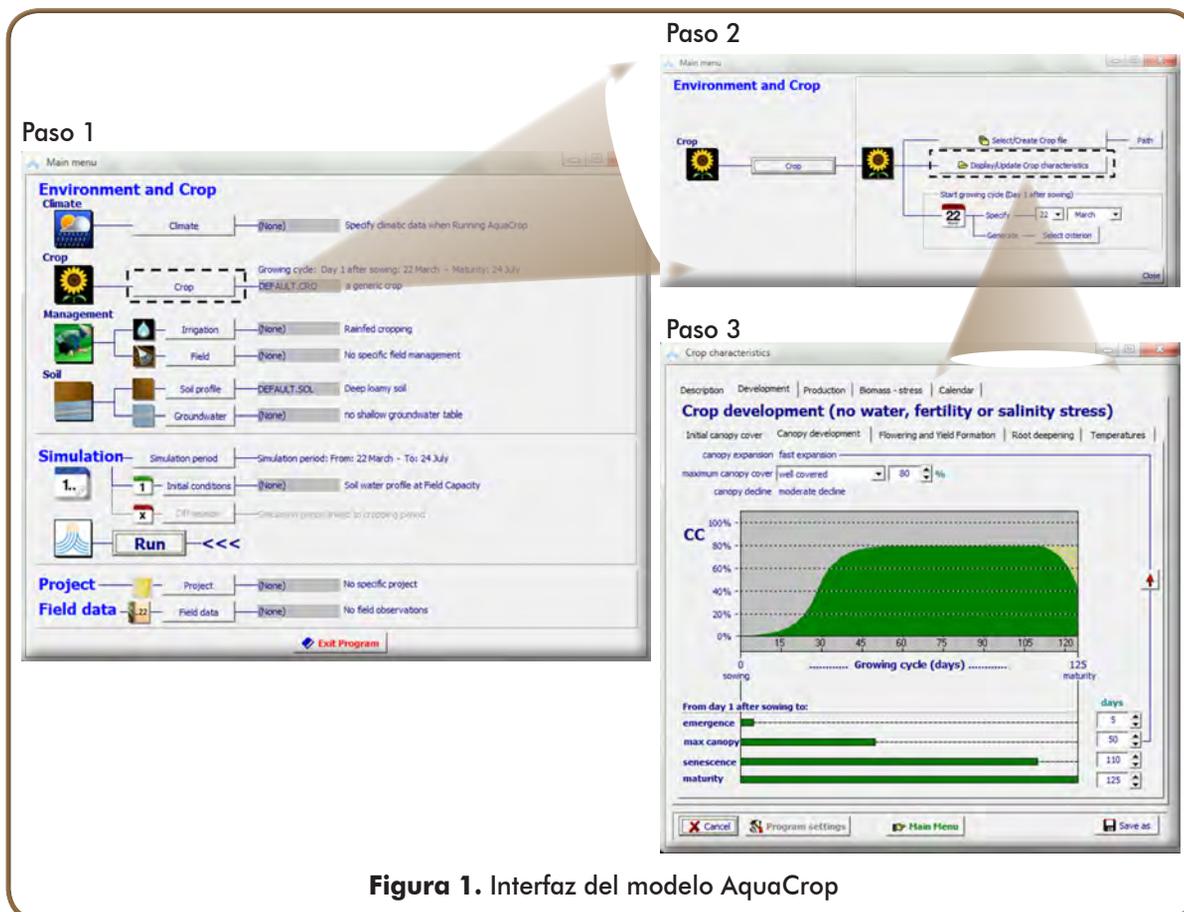


Figura 1. Interfaz del modelo AquaCrop

- Fecha de siembra (Cultivo): este parámetro permite especificar el día del año en el cual se siembra el cultivo.
- Cobertura de follaje inicial, CCo (Cultivo): este parámetro se requiere para describir la expansión del follaje en los primeros días de sembrado y se obtiene como el producto de la densidad de la planta (número de plantas por hectárea) y del tamaño del follaje a la siembra. En AquaCrop, dado este último, el usuario especifica bien sea la densidad de la planta o la cobertura del follaje inicial, mientras que el programa determina el valor del otro parámetro automáticamente.
- Cobertura del follaje máxima, CCx (Cultivo): este parámetro describe el porcentaje máximo de cobertura del follaje bajo condiciones óptimas.
- Días para alcanzar la máxima cobertura de follaje, Max CC (Cultivo): este parámetro especifica cuantos días se demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del follaje.
- Duración ciclo (Cultivo): Este parámetro permite especificar cuál es la duración del ciclo de desarrollo del cultivo

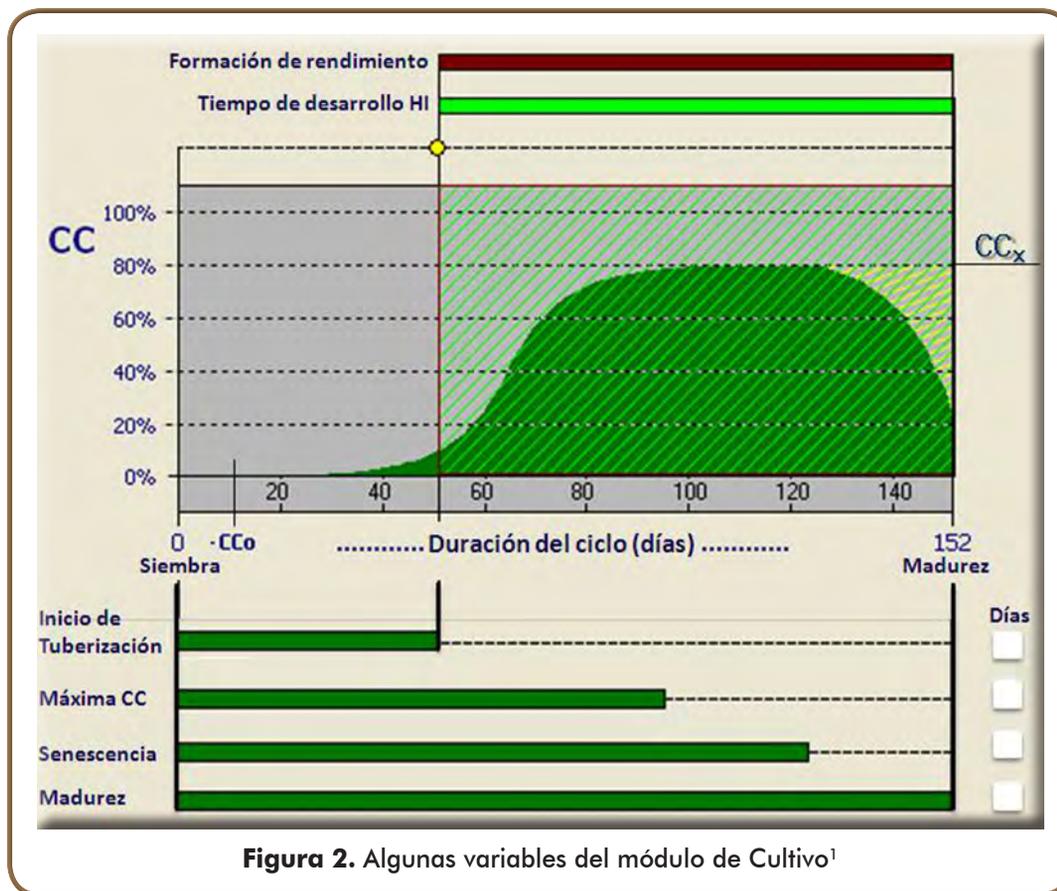


Figura 2. Algunas variables del módulo de Cultivo¹

- Índice de Cosecha (Cultivo): este parámetro establece una relación entre la biomasa y el rendimiento del cultivo². El usuario proporciona el índice de cosecha (HI) de referencia pero el valor que realmente tome el HI puede variar, pues el estrés por agua puede alterar el HI, bien sea negativa o positivamente, dependiendo del tiempo, la severidad y duración del estrés.
- Riegos (Prácticas de Manejo): AquaCrop tiene un submódulo de riego que permite especificar las características del método de riego utilizado en el cultivo. Dentro de las opciones disponibles se puede especificar la no existencia de un método de riego (el agua en la zona de raíces proviene entonces de la lluvia), se le puede proporcionar al módulo un cronograma de riego específico (especificando la cantidad de riego por día) o se puede programar automáticamente el riego especificando una condición límite (por ejemplo aplicar una lámina de riego determinada cada vez que la lámina de agua rápidamente aprovechable se agote en un porcentaje dado).

[1] Elaborado por el autor con base en las ventanas del software AquaCrop.

[2] $Y = HI * B$, donde Y es rendimiento, B es biomasa y HI es el índice de cosecha.



- Fertilidad (Prácticas de Manejo): el porcentaje de fertilidad viene dado por la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos. Este parámetro puede ser calibrado analizando la razón entre una parcela del cultivo bajo las condiciones normales de producción y otra con las condiciones óptimas (Raes *et al*, 2011).

AquaCrop ha sido previamente calibrado para algunos cultivos (ver tabla 1) en determinados lugares del mundo y el usuario puede seleccionar y hacer uso de alguna de estas calibraciones.

Tabla 1. Cultivos calibrados previamente para AquaCrop

Cultivo	Lugar
Algodón	Córdoba, España
Maíz	Davis, USA
Papa	Líma, Perú
Quinua	Bolivia
Tomate	Córdoba, España
Trigo	Valenzano, Italia
Girasol	Córdoba, España
Cebada	Tigray, Etiopía
Sorgo	Texas, USA
Remolacha azucarera	Foggia, Italia
Soya	Patancheru, India

Una vez se han determinado los diferentes parámetros de los módulos puede obtenerse la producción de biomasa seca y el rendimiento cosechable en peso seco. Esta etapa de la simulación se logra por medio del módulo Simulation, a través de la opción RUN.

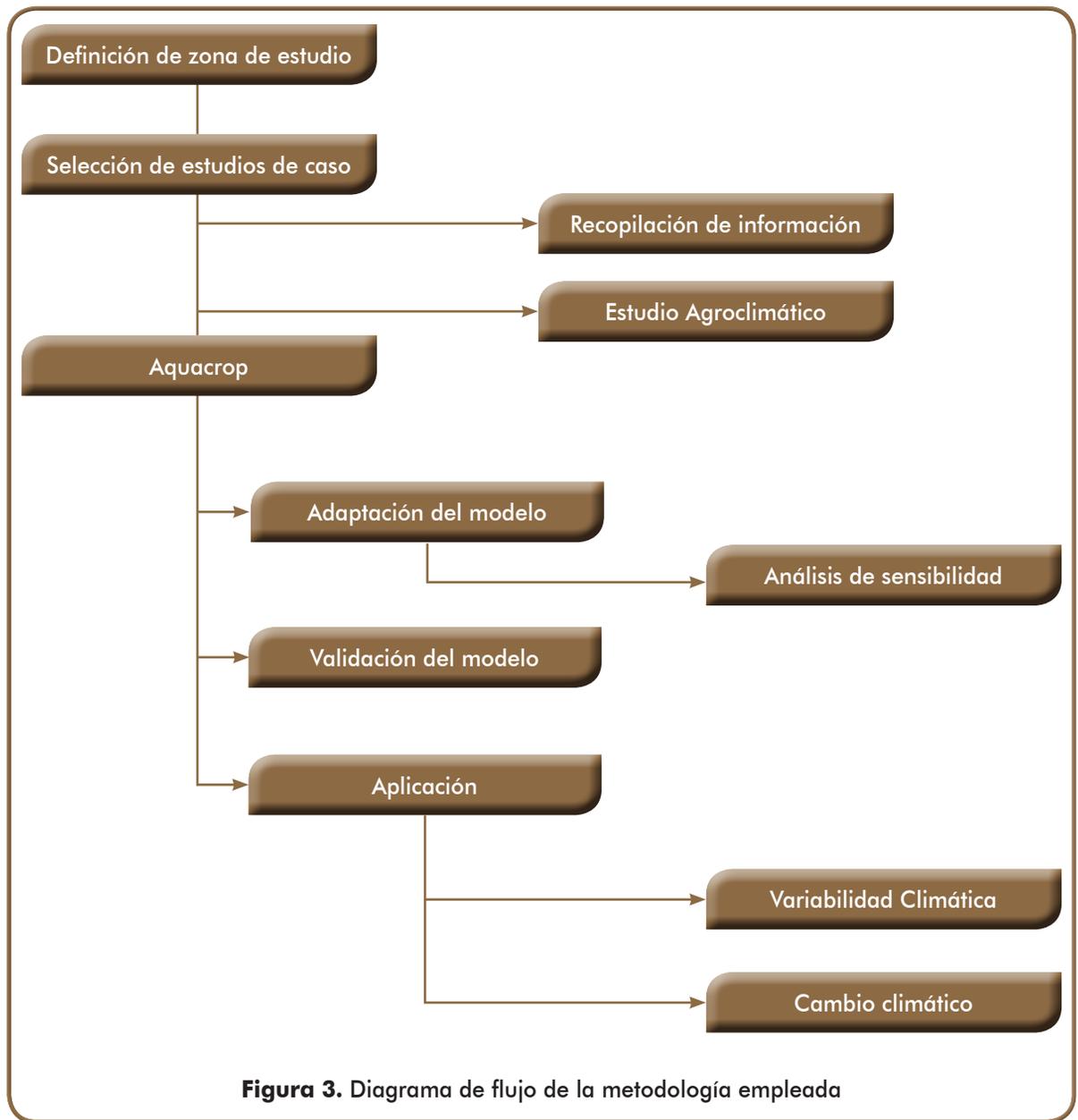
En esta sección sólo se proporciona una breve descripción de AquaCrop, enfatizando aquellos elementos de mayor uso para la adaptación del modelo. Para mayor comprensión de la parte teórica y de manejo, se recomienda visitar la página de la FAO, <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En la figura 3 se presenta un esquema general de la metodología utilizada en la adaptación del modelo AquaCrop al cultivo de papa en Colombia. Se seleccionaron tres estudios de caso, específicamente en los municipios de Zipaquirá, Mosquera y Tunja en los departamentos de Cundinamarca (los dos primeros) y Boyacá (el último). La selección de estas áreas de estudio obedeció a la disponibilidad de la siguiente información:

- Disponibilidad de series meteorológicas
- Disponibilidad de información de experimentos desarrollados por centros de investigación, gremios, federaciones, universidades, entre otros; de las principales variables de cultivo e información de rendimientos por ciclo investigado.
- Disponibilidad de información de suelos, principalmente enfocadas a variables hidrofísicas en varios horizontes.
- Disponibilidad de información de láminas, fechas de aplicación y tiempos de riego durante el ciclo de cultivo.
- Disponibilidad de información histórica de rendimientos de cultivo.





3.1. Información climática de la zona de estudio

La caracterización climática se realiza en estaciones meteorológicas cercanas a las zonas seleccionadas donde se tiene la información de cultivo necesario para realizar la adaptación del modelo de AquaCrop. En la tabla 2 se referencian las zonas de estudio, las estaciones climatológicas utilizadas y los materiales evaluados, mientras que la ubicación espacial de dichas estaciones en el altiplano cundiboyacense se observan en el figura 4.

El estudio climático de la zona de interés se llevó a cabo utilizando la información de la red climática de IDEAM de las estaciones descritas en la tabla 2, para el periodo comprendido

entre los años 1981 a 2010. Tan sólo se presentan climogramas para los municipios de Mosquera y Tunja, pues para el municipio de Zipaquirá no se contó con suficiente calidad y cantidad de registros para el periodo analizado de 30 años. No obstante esto no afecta el proceso de ajuste en la medida en que para el periodo de 6 meses utilizado en dicho proceso si se contó con toda la información necesaria.

Tabla 2. Zonas bajo estudio para el cultivo de la papa en el altiplano cundiboyacense

Departamento	Municipio	Nombre estación	Altitud	Código	Coordenadas geográficas		Material
					Latitud	Longitud	
Cundinamarca	Zipaquirá	La Cosecha	2600	21205910	4°59'21.2"N	74°00'4.3"W	Diacol
Cundinamarca	Mosquera	Tibaitatá	2543	21205420	4°41'29.1"N	74°12'32.4"W	Capiro-Pastusa
Boyacá	Tunja	UPTC	2690	24035130	5°33'12.8"N	73°21'19.0"W	Suprema

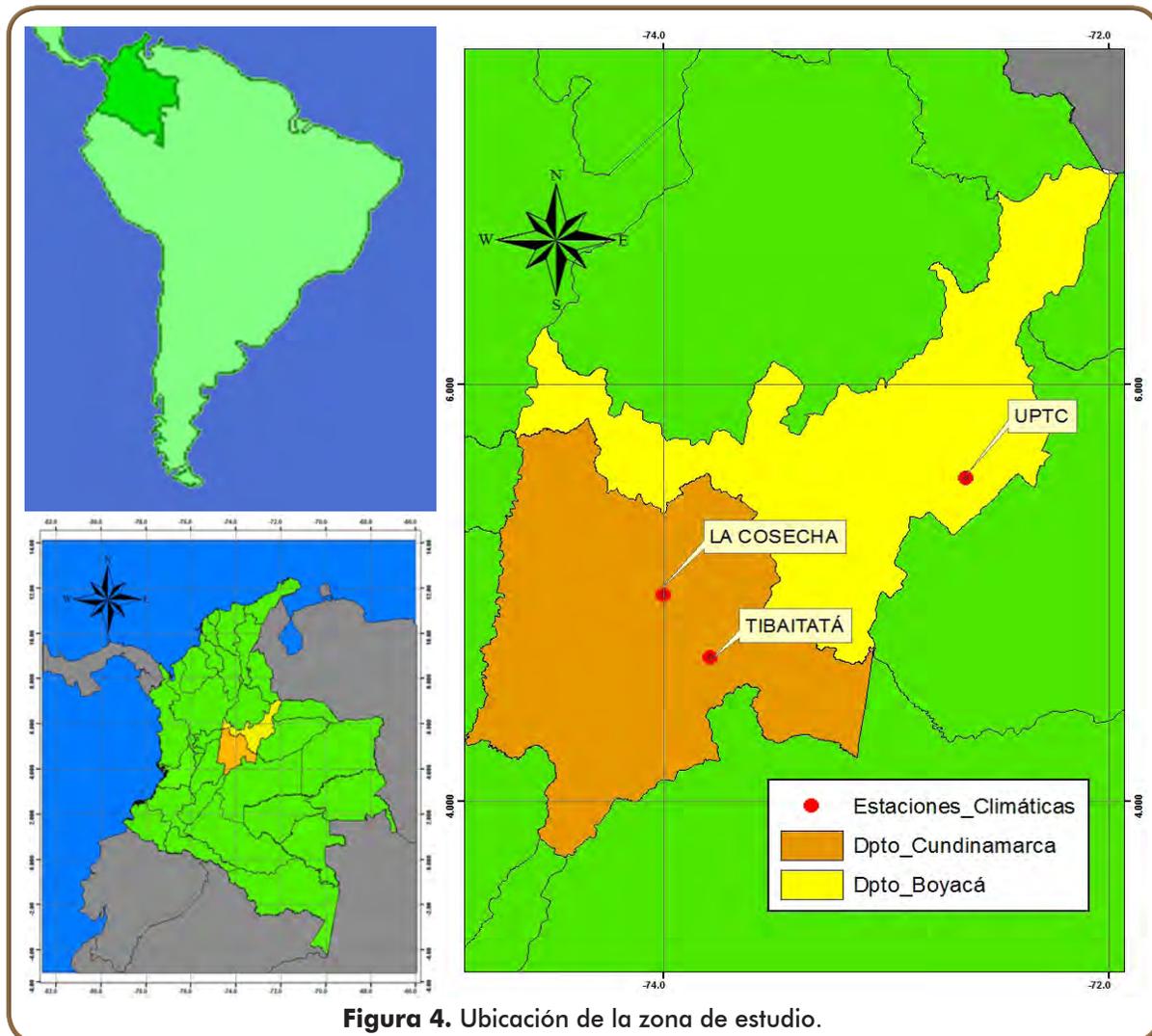


Figura 4. Ubicación de la zona de estudio.



3.2. Descripción de módulos y parámetros a implementar

Dentro del modelo AquaCrop se tiene una serie de módulos que permiten ingresar las variables externas, las variables de estado y los parámetros No Conservativos (Propios de cada región). A continuación se describen de manera general los requerimientos que se tuvieron en cuenta en el proceso de evaluación del modelo.

- **Módulo de Clima**

Se utilizaron registros diarios de las variables de las estaciones de la red meteorológica de IDEAM; precipitación, temperatura máxima y mínima, evapotranspiración de referencia (ET_o); la concentración de CO₂ asignada por defecto del modelo AquaCrop; y los resultados de las proyecciones de cambio climático simuladas por un ensamble multi-modelo (ver capítulo 2. 2) de IDEAM con los registros de dos de las estaciones de esta misma institución.

La ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específica, y no considera las características del cultivo, y los factores del suelo; este fenómeno resulta de la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen et al, 2006). Los únicos factores que afectan la evapotranspiración de referencia (ET_o) son parámetros climáticos. Por lo tanto la ET_o, también es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de los datos meteorológicos (Allen et al, 2006). AquaCrop no calcula la evapotranspiración de manera directa; para ello en este estudio se utilizó el software de circulación gratuita ET_o Calculator, desarrollado por la FAO, el cual es un módulo complementario del software AquaCrop y utiliza el método FAO Penman-Monteith para obtener la evapotranspiración de referencia en función de variables climáticas y de la localización geográfica.

- **Módulo de cultivo**

El ajuste del modelo AquaCrop se trabajó con las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema y sólo se modificaron los parámetros No Conservativos, es decir aquellos que son característicos de la región en estudio, tales como la fenología, tipo de suelo, prácticas culturales entre otros. Se utilizaron los datos de calibración encontrados en Segura, Santos & Núñez (2006). Las salidas generadas por el modelo se contrastaron con las evaluaciones estadísticas de seguimiento de biomasa aérea y en tubérculo, e índice de cosecha.

- **Módulo suelo**

Este módulo requiere parámetros físicos como textura del suelo, Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo, Punto de Saturación y Conductividad Hidráulica Saturada. Toda esta información se obtuvo del trabajo de Santos & Segura (2005).

- **Módulo de manejo de cultivo**

- ▶ **Riegos**

En la etapa de ajuste del modulo del cultivo de papa no se aplicaron laminas de riego debido a que en el experimento utilizado como base no se registraron practicas de riego.

Se supuso un nivel freático cercano a los 2 metros de profundidad el cual genera un pequeño aporte hídrico por ascenso capilar a la zona radicular.

- ▶ **Prácticas agrícolas**

Se trabajó con un nivel de fertilidad potencial, porque en el ensayo se reporta análisis fisicoquímico de suelos, balance de nutrientes y aplicación de enmiendas. Por esta razón se implementaron las condiciones que garantizan un rendimiento potencial.

3.3. Adaptación del modelo de AquaCrop

La adaptación del modelo AquaCrop versión 4.0, para la simulación de los rendimientos del cultivo de la papa, se realizó con base en información de fenología, suelos y prácticas de manejo del experimento de Santos & Segura (2005), y la información hidrometeorológica de la estación La Cosecha registrada diariamente para el año 2004, proporcionada por IDEAM. Para el ajuste del modelo AquaCrop se seleccionaron dos variedades de papa, Diacol Capiro y Pastusa Suprema. La densidad de siembra de estas variedades fue de 25.000 plantas*ha-1 en el municipio de Zipaquirá - Cundinamarca.

Una descripción general del proceso de ajuste se puede encontrar en la figura 5. El esquema de trabajo para el ajuste del modelo AquaCrop tiene como punto de partida la definición de los parámetros No Conservativos, los cuales son asignados de acuerdo a la disponibilidad de información de seguimiento agronómico en las distintas etapas del cultivo, de acuerdo a los registros de rendimientos históricos ya sea en biomasa o producto cosechado, o utilizando información secundaria. Una vez se cuenta con estos parámetros puede observarse el comportamiento de diferentes procesos o variables determinantes que caracterizan el proceso evolutivo del cultivo o su resultado final (cobertura de follaje, biomasa, rendimiento). Estos juegan un papel determinante en el proceso posterior a la simulación, pues son el criterio que permite aprobar o desaprobar el ajuste, en tanto que los valores simulados son comparados (utilizando una medida de ajuste apropiada) con los resultados obtenidos en campo, la información histórica o la información secundaria que se tenga de los mismos. Si el ajuste obtenido no es el adecuado se procede a cambiar algún/algunos parámetros conservativos y se vuelve a iniciar el proceso descrito. En el caso de la papa, la bondad de ajuste se determinó por medio del seguimiento de la materia seca: se analizó que tan bien se ajustaba la acumulación de materia seca (en tubérculo y total) y el cambio en el índice de cosecha que arroja AquaCrop con los datos obtenidos por Santos & Segura (2005).



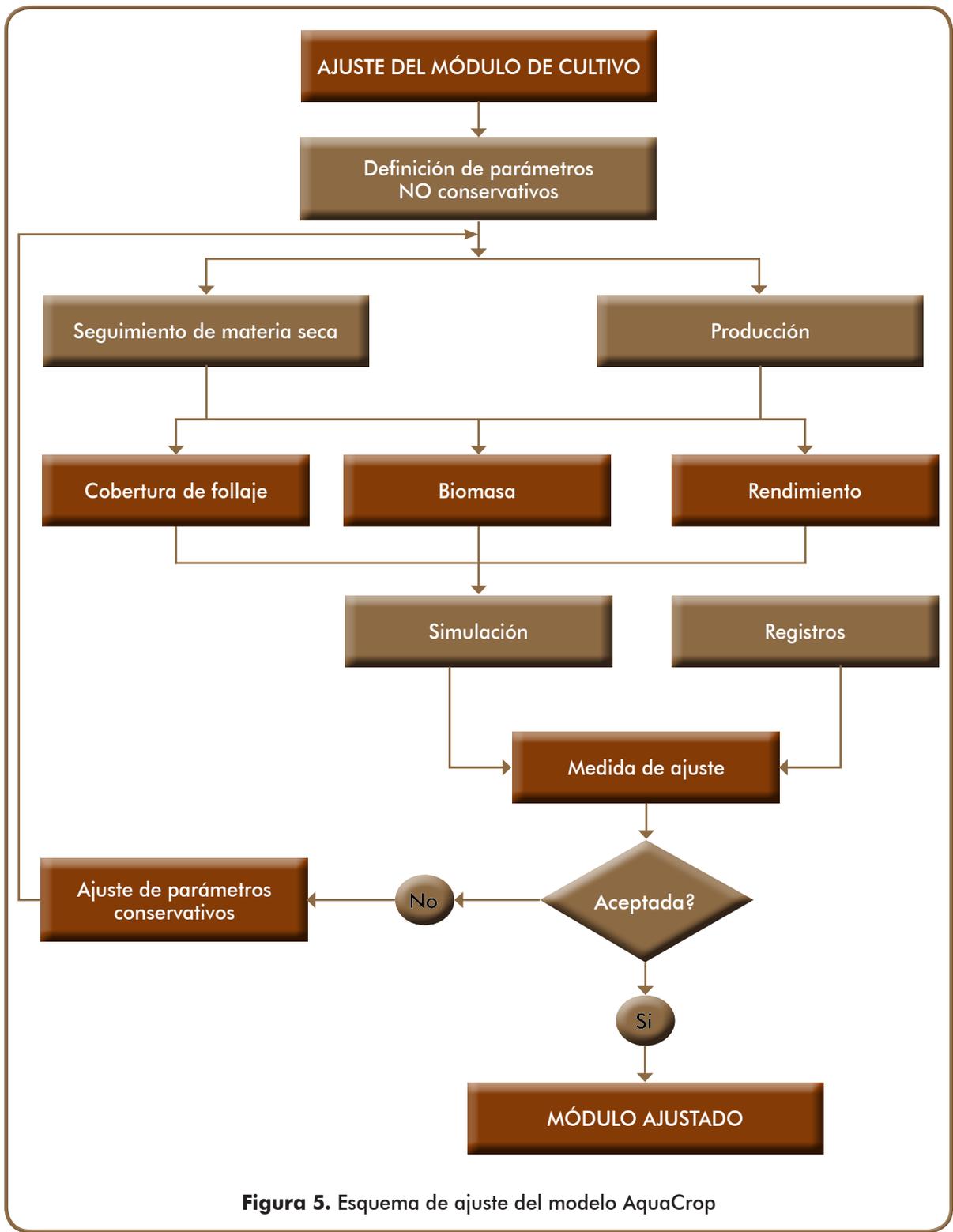


Figura 5. Esquema de ajuste del modelo AquaCrop

Toda la información empleada tanto en el proceso de ajuste, como en el de validación y aplicación del modelo AquaCrop se obtuvo del trabajo de Santos & Segura (2005) y de la calibración de papa que trae AquaCrop dentro de su base de datos, y se encuentra resumida en la tabla 3, agrupada de acuerdo al módulo de AquaCrop al cual pertenece.

Tabla 3 Información requerida para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop

Módulos de Aquacrop				
Cultivo	Clima	Suelo	Prácticas de manejo	
			Riego	Campo
Emergencia, Cobertura de follaje inicial (o densidad de siembra), Cobertura Máxima de follaje, Inicio y duración de floración, Senescencia, Madurez fisiológica del grano, Índice de Cosecha (HI), Fecha de Siembra, Método de Siembra, Temperatura críticas (Base y Máxima), Profundidad inicial y máxima de raíces, Días a máxima profundidad de raíces, Productividad de Agua (WP*).	Precipitación, Temperaturas Máxima y Mínima, Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET _o), Concentraciones de CO ₂ .	Textura, Número de Horizontes, Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de campo, Punto de Saturación, Conductividad Hidráulica Saturada, Curva Número (CN), Lámina rápidamente evaporable (REW), Profundidad de capa restrictiva, Profundidad de nivel freático.	Método de irrigación, Lámina Neta de Riego, Lámina Bruta de Riego, Fechas de aplicación de Riego, Eficiencia de la aplicación de Riego.	Grado de fertilidad del suelo respecto al cultivo, Presencia de acolchados o residuos de cosecha, Capa de agua permanente sobre el suelo





3.4. Análisis de sensibilidad

Para entender la susceptibilidad del modelo a los cambios en las características medioambientales y cómo esa susceptibilidad puede afectar las salidas en biomasa y/o rendimientos, con base en el ajuste llevado a cabo previamente para el experimento en el municipio de Zipaquirá, se seleccionaron algunas de las principales entradas del modelo, las cuales fueron variadas dentro de un rango específico para observar cómo se veían reflejadas en las salidas de los rendimientos del cultivo. Todas las comparaciones de variación porcentuales que se realizaron fueron respecto a los valores de biomasa y rendimientos finales (cosecha) simulados en la etapa de ajuste del modelo. Las salidas para Diacol Capiro fueron de 11.874 t*ha^{-1} en biomasa y en rendimiento de 10.127 t*ha^{-1} , y para Pastusa Suprema fueron de 15.834 t*ha^{-1} biomasa y de 11.340 t*ha^{-1} en rendimiento. El análisis de sensibilidad se llevó a cabo sobre las siguientes entradas:

- Diferentes láminas rápidamente aprovechables (RAW) y láminas netas.
- Nivel freático
- Nivel de fertilidad del suelo
- Nivel de profundidad de capas compactas
- Diferentes texturas del suelo

3.5. Validación de AquaCrop

La validación del ajuste del modelo AquaCrop se realizó para el segundo semestre del 2005 para los municipios de Mosquera, Cundinamarca y Tunja en el departamento de Boyacá. Este proceso consiste en realizar simulaciones utilizando los parámetros conservativos ajustados previamente a las condiciones colombianas para el cultivo de papa, es decir, se utiliza el mismo módulo de cultivo creado en la parte de ajuste del modelo y se modifican de ser necesario, los parámetros no conservativos³, y otros parámetros que describen el desarrollo del follaje del cultivo, especialmente el valor del coeficiente de crecimiento del follaje (CGC) y del coeficiente de decaimiento del follaje (CDC). Es necesario entonces que exista algún registro de rendimiento o medición de variables de desarrollo del cultivo para comparar las salidas del modelo con estas y así determinar si el modelo es capaz de representar el comportamiento del cultivo en diferentes zonas productoras.

[3] Parámetros no conservativos, son condiciones dependientes del cultivo, generalmente conocidos, que varían con cada cultivo. Por ejemplo el ciclo y fenología del cultivo, (Steduto et al., 2012).

La validación se realizó para el rendimiento seco, variable de la cual se tenía información. Con esta intención, se trabajó con información secundaria obtenida del trabajo experimental de Terán (2006), quien registró el rendimiento de papa variedad Diacol Capiro en el segundo semestre de 2005, en inmediaciones del centro de investigación en Corpoica Tibaitatá (Mosquera). Para la zona de Tunja se realizaron las comparaciones de valores simulados con el rango de los rendimientos potenciales de cada variedad, según su ficha agronómica, ya que para dicha zona no se tenían registros de rendimiento confiables. La fecha de cosecha se determinó por el cálculo de los Grados Día Acumulados (GDD) estimados en la etapa de ajuste del modelo.

3.6. Aplicación de AquaCrop

Con el objetivo de analizar por medio de AquaCrop cuál es el comportamiento de los rendimientos de la papa ante variaciones en los patrones climáticos se procedió a aplicar el modelo AquaCrop ajustado previamente a tres fenómenos climáticos de vital importancia para el país: la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el fenómeno del Niño, ENSO y el fenómeno del cambio climático. En las siguientes secciones se describen brevemente estos fenómenos y se analiza el impacto que tienen sobre la productividad de la papa.

3.6.1. Escenarios de variabilidad climática

Se analizaron los efectos de variabilidad climática intra e interanual para el periodo 2000-2011 para la estación Tibaitatá, y el periodo 2000-2010 para la estación UPTC, contándose con registros meteorológicos a nivel diario, lo que permitió el cálculo de la evapotranspiración de referencia, siendo consecuentes con los resultados encontrados en las etapas de ajuste y validación, y teniendo en cuenta las prácticas culturales en cada zona.

La variabilidad climática de carácter intranual se ve regulada por el paso de la ZCIT por el territorio nacional, mientras que la interanual se debe al efecto del fenómeno ENSO (El Niño Oscilación del Sur). Para el análisis de los efectos de la variabilidad climática intranual se propone realizar dos siembras en los dos semestres agrícolas (A y B). Para el análisis de los efectos de la variabilidad interanual, se identificará cada uno de los semestres (en los 10 años de análisis) bajo el efecto de alguna de las fases del ENSO: Niño, Niña o Neutro. Posteriormente se promediarán las salidas de rendimiento, por semestres agrícolas y por fase ENSO, con la intención de identificar máximas y mínimas producciones, y analizar las posibles razones de estos comportamientos.

Los escenarios que se plantearon fueron bajo condiciones SIN RIEGO y con niveles de fertilidad SIN LIMITACION (100%). Se realizaron simulaciones para los dos semestres del





año, utilizando la fecha de siembra generada por el software AQUACROP bajo el criterio de contar con al menos 25 mm de lluvia durante 5 días consecutivos.

3.6.2. Escenarios de cambio climático

Para este ejercicio se contó con las corridas realizadas por el IDEAM en los escenarios de cambio climático A2 y B2. El IDEAM realizó un ensamble multimodelo (IDEAM, 2010), donde utilizaron tres modelos regionales: El modelo global de alta resolución GSM-MRI⁴ con resolución horizontal de 20 km * 20 km, el modelo PRECIS⁵ con resolución horizontal de 25 km * 25 km y el modelo CCSM-WRF⁶ con el cual se generaron resultados a 4 km * 4 km para la región Andina. Las salidas de este modelo son las variables de precipitación media mensual, temperaturas máximas y mínimas media mensuales, desde el año 2010 hasta el 2100.

Haciendo uso de estas predicciones se llevaron a cabo unas simulaciones utilizando la herramienta AquaCrop, con la intención de estudiar tanto los efectos del cambio climático, como las posibles medidas de adaptación del cultivo de la papa. Para tal fin se plantearon dos escenarios: en el primero se mantuvo una oferta tecnológica con una lamina de riego que supiera las necesidades hídricas del cultivo (aproximadamente 10mm/semana) teniendo en cuenta los requerimientos estimados para la media climática 1981-2010, y en el segundo se estimó una aplicación de agua que mantuviera constante la humedad del suelo a una humedad igual al 50% de la lamina de agua rápidamente aprovechable y que mantuviera la producción de tubérculo con variaciones en sus salidas inferiores al 10%. Para los dos ejercicios se usaron los parámetros evaluados para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema en los municipios de Mosquera y Tunja. No se trabajó con el municipio de Zipaquirá por disponibilidad de datos. El modelo AquaCrop se corrió para los escenarios A2 y B2 del IPCC y para los periodos 2021-2030 y 2041-2050.

Los resultados que se van a presentar corresponden a las salidas del modelo AquaCrop una vez se han incorporado los cambios en el clima que se preveen de acuerdo a los escenarios de cambio climático contemplados, por lo que deben considerarse tan solo como indicativos y no como proyecciones precisas de lo que va a suceder en el futuro. No debe olvidarse la alta incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas futuras.

[4] Global Spectral Model - Meteorological Research Institute del Japón.

[5] Providing Regional Climates for Impacts Studies del Reino Unido.

[6] Community Climate System Model - Weather Research and Forecast de los Estados Unidos.

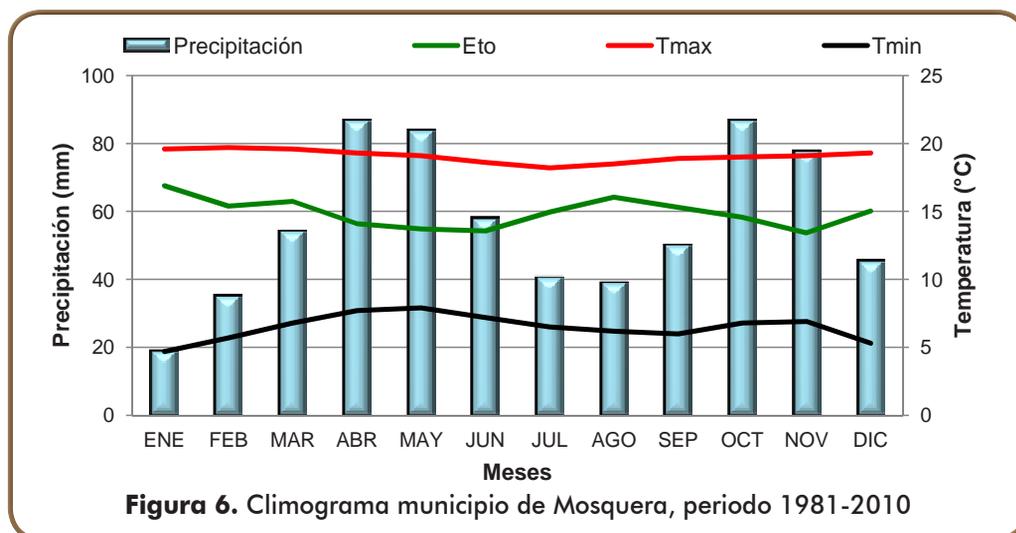
4. RESULTADOS

4.1. Análisis agroclimático

La zona del altiplano cundiboyacense representa el 67 % tanto en producción como en hectáreas sembradas de papa en el país. El rendimiento del tubérculo en esta zona depende principalmente de las condiciones climáticas, variedad sembrada, características fisicoquímicas de los suelos en los cuales se establece el cultivo y de las prácticas agrícolas (siembra, aporque, fertilización, riego, cosecha). El rango de temperatura de desarrollo óptimo de la papa oscila entre 10 °C a 15 °C y de precipitación entre 500 a 2500 mm*año⁻¹, (Segura, Santos & Ñuztes, 2006).

El comportamiento pluviométrico que presentan los municipios de Mosquera en Cundinamarca (figura 6), y Tunja en Boyacá (Figura 7), es bimodal, con dos épocas húmedas y dos secas, asociadas al paso de la ZCIT en su desplazamiento latitudinal hacia el norte en el primer semestre y hacia el sur en el segundo semestre. Los periodos húmedos se presentan en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre para Mosquera y para Tunja los meses de mayo-junio y noviembre-diciembre. La precipitación media anual es de 675.7 mm y 667.8 mm para las estaciones Tibaitatá y UPTC, respectivamente.

En general, para las variables de temperatura máxima y mínima, se presentan dos picos en el año, (figuras 6 y 7). Los dos máximos de temperatura durante el año son propios del clima de la franja ecuatorial y son el producto de la migración meridional del ecuador térmico, (Pabón, 2011).



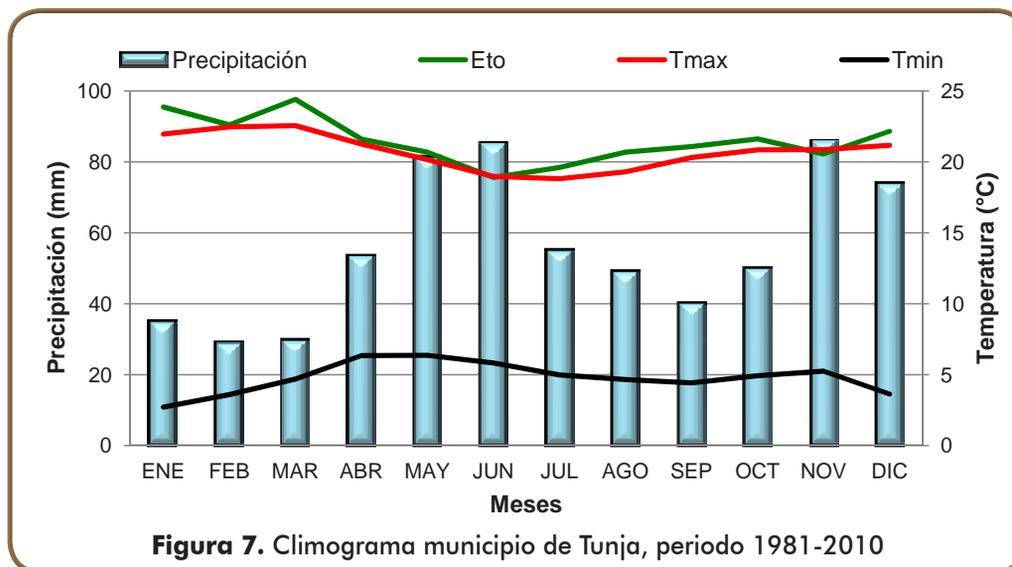


Figura 7. Climograma municipio de Tunja, periodo 1981-2010

Otras variables que determinan las necesidades hídricas y el desarrollo del cultivo son brillo solar y humedad relativa. Para la estación Tibaitatá se registra brillo solar de 1630 hora* año^{-1} , y en la estación UPTC de 1958 hora* año^{-1} . En el caso de la humedad relativa el valor promedio de esta variable es de 82 % y 79 % para las zonas de Mosquera y Tunja, respectivamente.

Siendo así, en algunos periodos de desarrollo del cultivo, se requieren láminas de agua que permitan desarrollarlo de manera óptima, con el fin de obtener un producto cosechable (tubérculo) adecuado para consumo, en el que se obtenga además valores de rendimiento que conduzcan a ganancias económicas. Esta cantidad de agua se puede estimar a través de la evapotranspiración de referencia, (figuras 6 y 7).

Los valores de evapotranspiración de referencia estimados utilizando la ecuación de FAO-Penman Monteith, son 715 mm* año^{-1} y 1031 mm* año^{-1} para los municipios de Mosquera y Tunja, respectivamente. El mayor nivel de evapotranspiración en el municipio de Tunja se debe principalmente a la diferencia que se registró de horas sol, la cual fue mayor para la estación UPTC, lo que se reflejó en mayor radiación y capacidad evapotranspirativa. Lo anterior se ve reflejado en la mayor capacidad de la atmósfera de retirar vapor de las superficie evaporante por el déficit de presión (Allen et al, 2006).

Realizando un balance hídrico global se observa que para la estación UPTC la mayor parte del periodo anual multianual evaluado, existe déficit hídrico, lo que conllevaría a requerir mayores láminas en comparación con la estación Tibaitatá. En general, en el cultivo de papa no se ha implementado de manera masiva las tecnologías de riego, lo que sumado al déficit hídrico presentado en diferentes etapas del desarrollo de la planta, afecta los rendimientos de la papa, siendo este déficit crítico en la etapa inicial de desarrollo.

El municipio de Zipaquirá, localizado en la provincia de Sabana Centro al norte de Bogotá D.C, se encuentra a una altitud promedio de 2600 msnm, y se caracteriza por tener un clima frío y un régimen hidrológico bimodal. La temperatura media anual es de 14°C y se ha estimado una precipitación media anual de 1158 mm.

Zipaquirá presenta una temperatura media de 14°C que es influenciada por las variaciones de altura presentes en el municipio, las cuales oscilan entre los 2.600 y 3.500 m.s.n.m., con una mínima promedio que varía entre los 7 y 12°C y una máxima promedio que varía entre los 17 y 20°C.

El municipio de Zipaquirá presenta un clima de tipo bimodal; una primera temporada de lluvias de mediados de marzo a mediados de junio y la segunda más húmeda de mediados de septiembre a mediados de diciembre.

El comportamiento espacial de la lluvia, se estimó en los 1.100 mm*año⁻¹, en las zonas más altas (páramo 2.650 y 2.900 m.s.n.m.). Existe una zona de transición de menor pluviosidad correspondiente al piedemonte donde se observan precipitaciones entre 900 y 950 mm al año.

Respecto el brillo solar, en Zipaquirá se identifican dos períodos de máximos y dos de mínimo a lo largo del año. Los promedios anuales de hora*día⁻¹ de brillo solar varían entre 3.7 y 4.1 con registros máximos absolutos durante los meses de diciembre y enero (5.1 hora*día⁻¹) y mínimos absolutos en junio (3.5 hora*día⁻¹); con oscilaciones de 1.6 horas día durante el año.

En el caso de la evapotranspiración el comportamiento a lo largo del año se encuentra relacionado con las variaciones estacionales de lluvias, con dos periodos de mínimos, observándose las mayores en el primer periodo seco, especialmente en el mes de enero y las mínimas en junio y noviembre. Se identifican valores mínimos cercanos a 785 mm en la parte alta y en la parte baja 800 mm aproximadamente.

4.2. Ajuste del modelo

A continuación se presentan los principales resultados del proceso de ajuste de AquaCrop al cultivo de papa en Colombia. Las figuras 8, 9 y 10 presentan tanto los datos tomados de Santos & Segura (2005), como los valores simulados por AquaCrop para las variables acumulación de materia seca total o biomasa (figura 8), acumulación de materia seca en el producto cosechable o tubérculo (figura 9) y la relación porcentual entre la materia seca cosechable y la materia seca total de la planta o índice de cosecha (figura 10). Los parámetros y fuentes de información utilizadas para la adaptación del modelo a las condiciones locales se encuentran especificados en el anexo de esta cartilla.



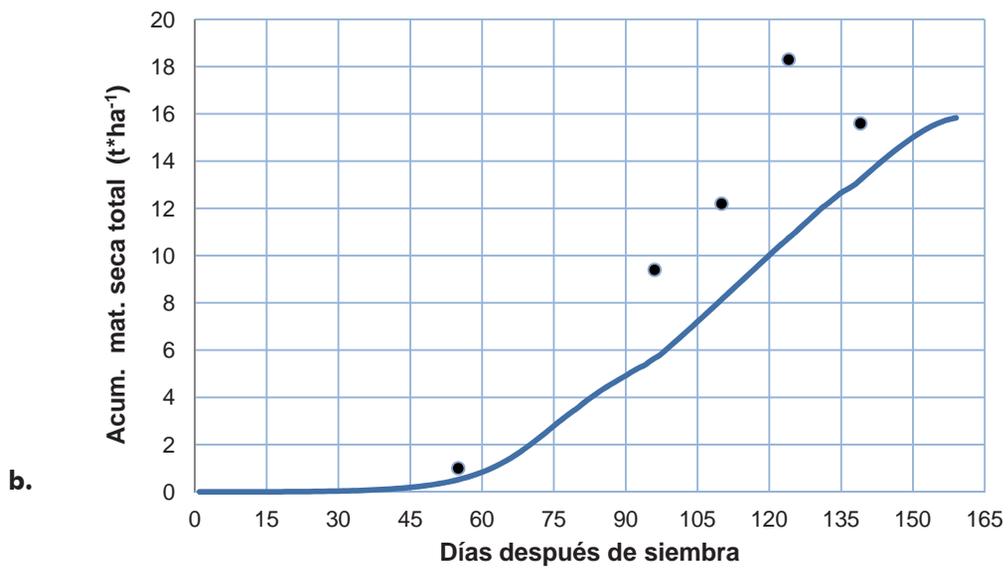
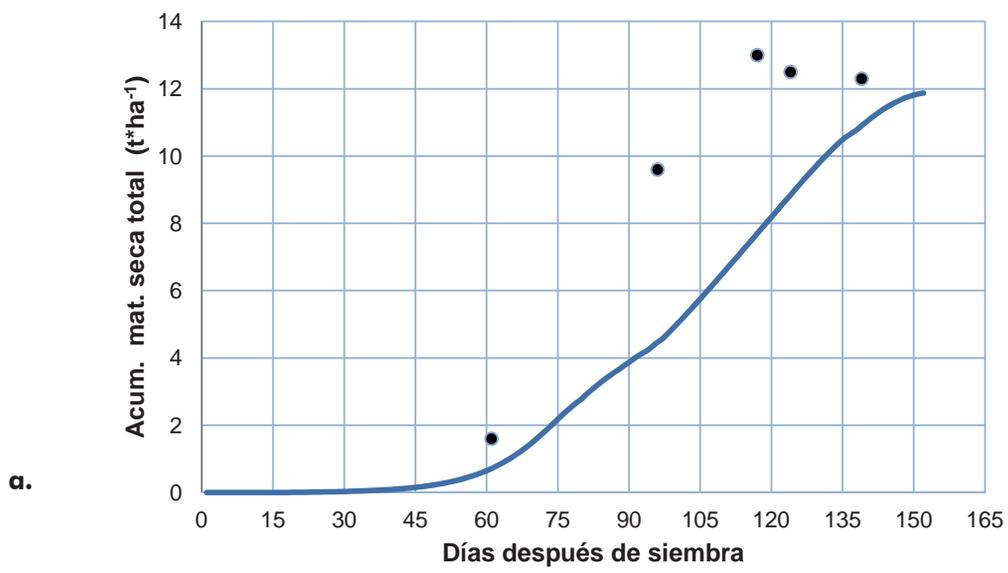


Figura 8. Biomasa Simulada vs Registros experimentales. En **a** Comportamiento de la biomasa para Diacol Capiro. En **b** Comportamiento de la biomasa para Pastusa Suprema

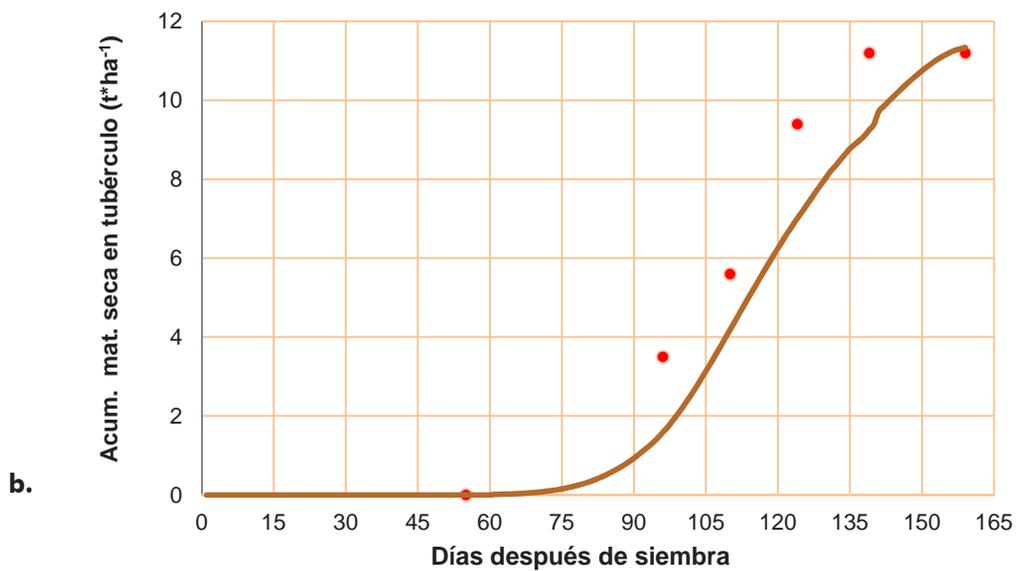
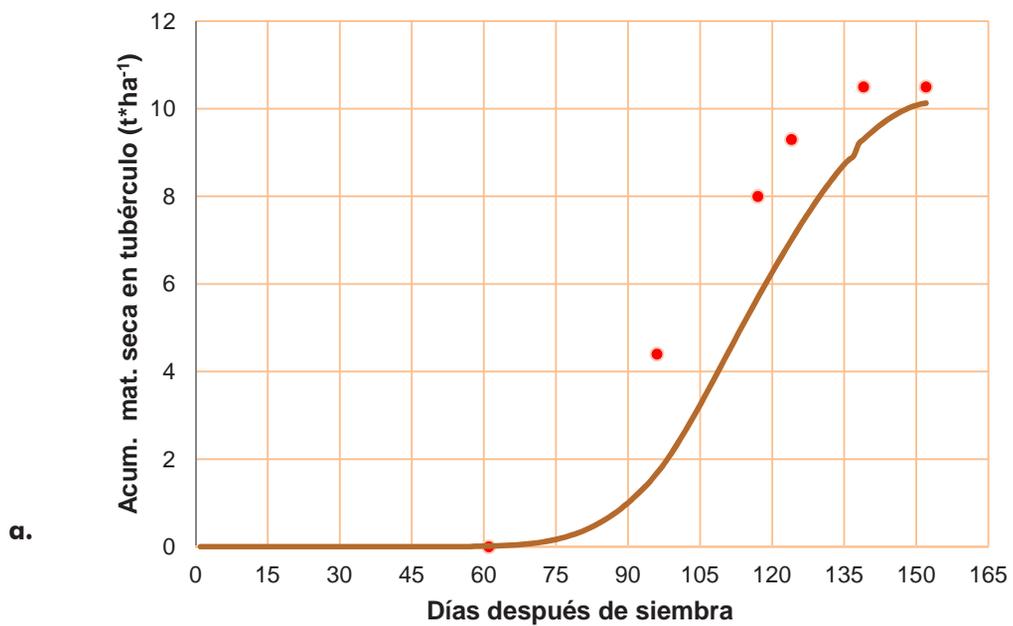
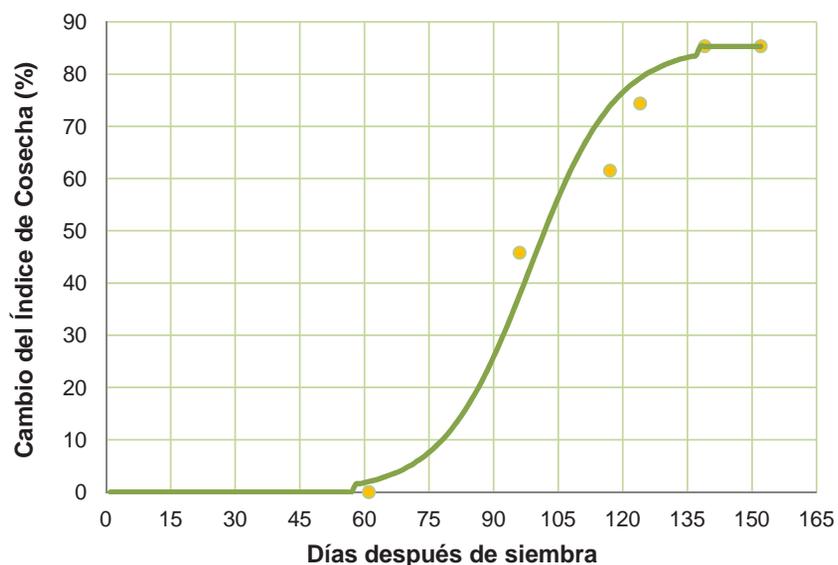


Figura 9. Rendimiento simulado vs Registros experimentales. En **a** Comportamiento del rendimiento para Diacol Capiro. En **b** Comportamiento del rendimiento para Pastusa Suprema





a.



b.

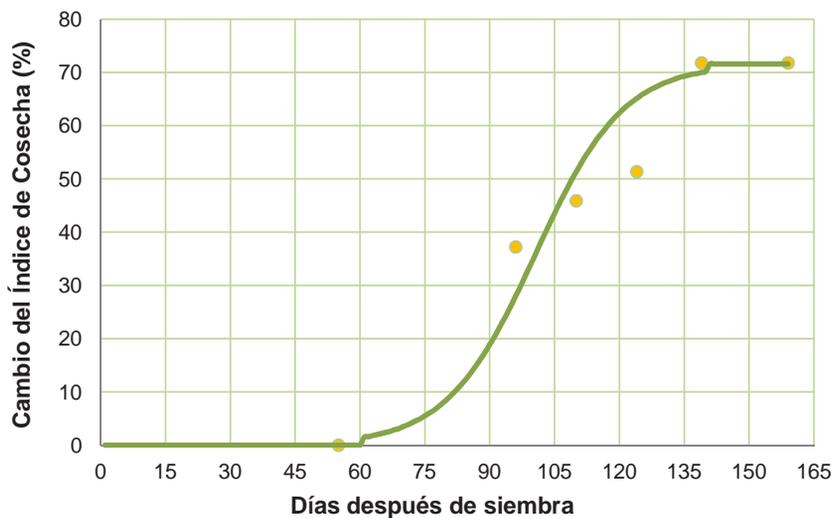


Figura 10. Índice de Cosecha(IC) Simulado vs Registros experimentales. En **a** Comportamiento del IC para Diacol Capiro. En **b** Comportamiento del IC para Pastusa Suprema

Para las variedades analizadas se observa buen ajuste entre las variables registradas y simuladas en las diferentes etapas fenológicas. Adicionalmente, la forma de las curvas de biomasa total y materia seca en el tubérculo son similares a estudios realizados en Corpoica (2010), cuyas gráficas presentan formas crecientes hasta el momento de la cosecha, con tendencia a estabilizarse en la etapa final de desarrollo. Los puntos intermedios tienen un buen ajuste con la línea simulada para la variable rendimiento.

Se observó que las salidas de rendimiento e índice de cosecha, son muy cercanas a los valores experimentales. Las diferencias absolutas en rendimiento en la cosecha son de 0.37 t*ha^{-1} y 0.14 t*ha^{-1} para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema, respectivamente. Para el caso del índice de cosecha potencial, las diferencias al final del ciclo de cultivo

no superaron los dos puntos porcentuales, indicando que tanto las variables biomasa total como el rendimiento están siendo representadas adecuadamente. La variable que mostró mayores diferencias fue la acumulación de biomasa total. Lo anterior se puede deber a las suposiciones que realiza el modelo AquaCrop, el cual realiza una acumulación de biomasa hasta el momento de la cosecha, lo cual en campo es algo diferente, ya que debido a la muerte de las estructuras aéreas de la planta, y la acumulación de biomasa en tubérculo, este peso total tiende a ser constante al final del ciclo.

En las figuras 11 y 12 se observan las salidas graficas del modelo AquaCrop, para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema, respectivamente. Al mirar el desarrollo del follaje (panel CC, franja verde sombreada) y la disponibilidad de agua en la zona radicular (panel Dr, franja azul sombreada) para las variedades objeto de análisis, se observa que existió estrés hídrico por déficit de humedad (la parte superior de la franja azul se ubicó por debajo de la línea verde en el panel Dr), lo que indujo una reducción de la expansión foliar, que según la conceptualización del modelo, se traduce en una disminución en la producción de biomasa, debido una reducción de la capacidad transpirativa de la planta. En ocasiones la humedad del suelo disminuyó hasta niveles donde se agoto totalmente la lamina de agua rápidamente aprovechable (100% RAW), causándose cierre estomático (la línea roja en el panel DR) y en algunas veces inicio rápido de la senescencia (línea amarilla en el panel DR), lo que afectó el potencial de producción del tubérculo. La franja gris sombreada indica el desarrollo de follaje potencial el cual no se alcanzó debido a algún efecto causado por estrés hídrico.

Aunque el nivel freático se supuso cercano a los 2 metros de profundidad, es importante tener en cuenta los aportes por ascenso capilar, los cuales en algunas etapas del ciclo vegetativo aportaron láminas que fueron importantes para el buen desarrollo del cultivo.

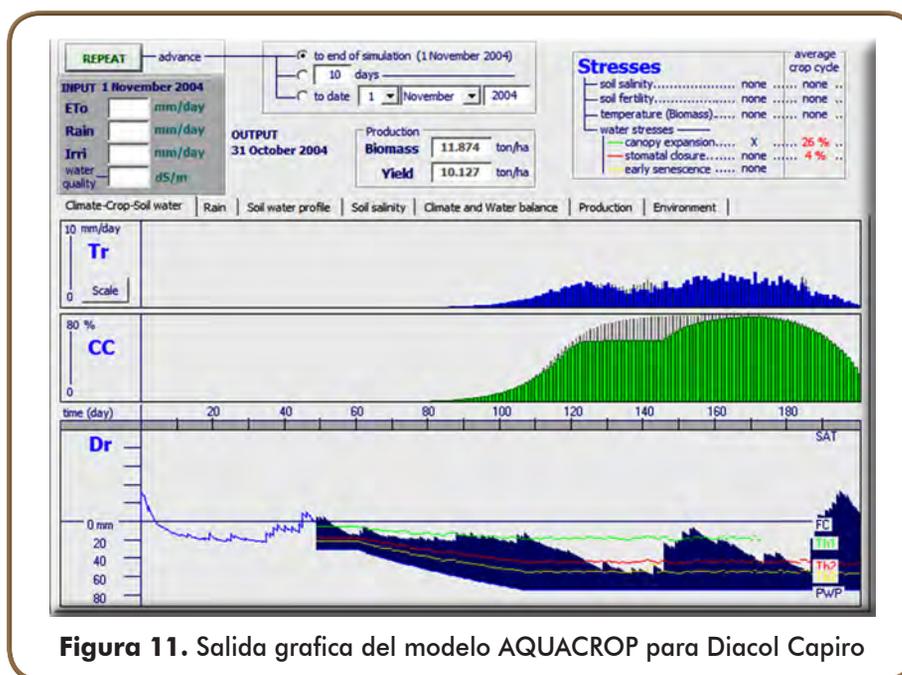


Figura 11. Salida grafica del modelo AQUACROP para Diacol Capiro

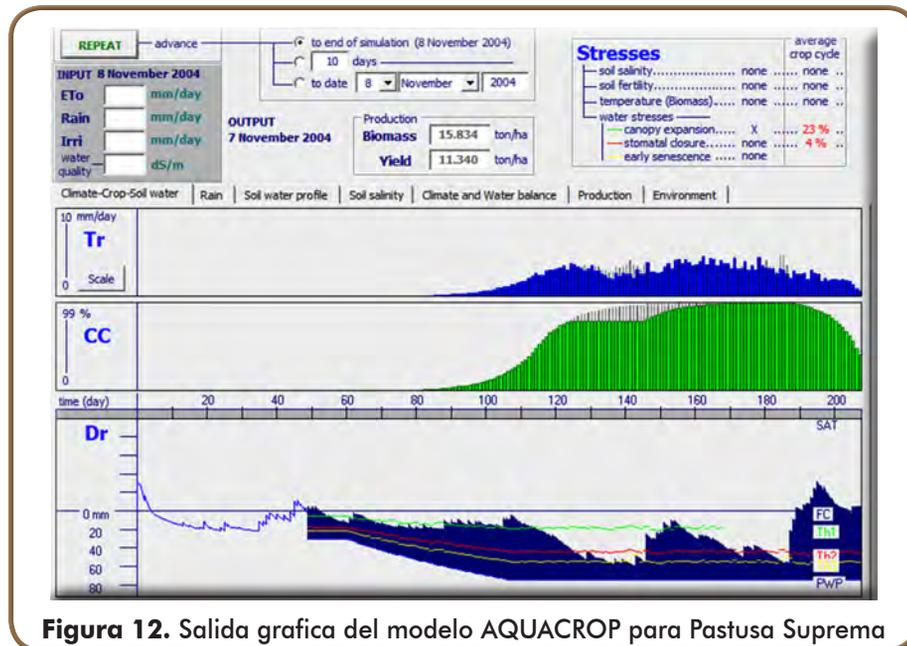


Figura 12. Salida grafica del modelo AQUACROP para Pastusa Suprema

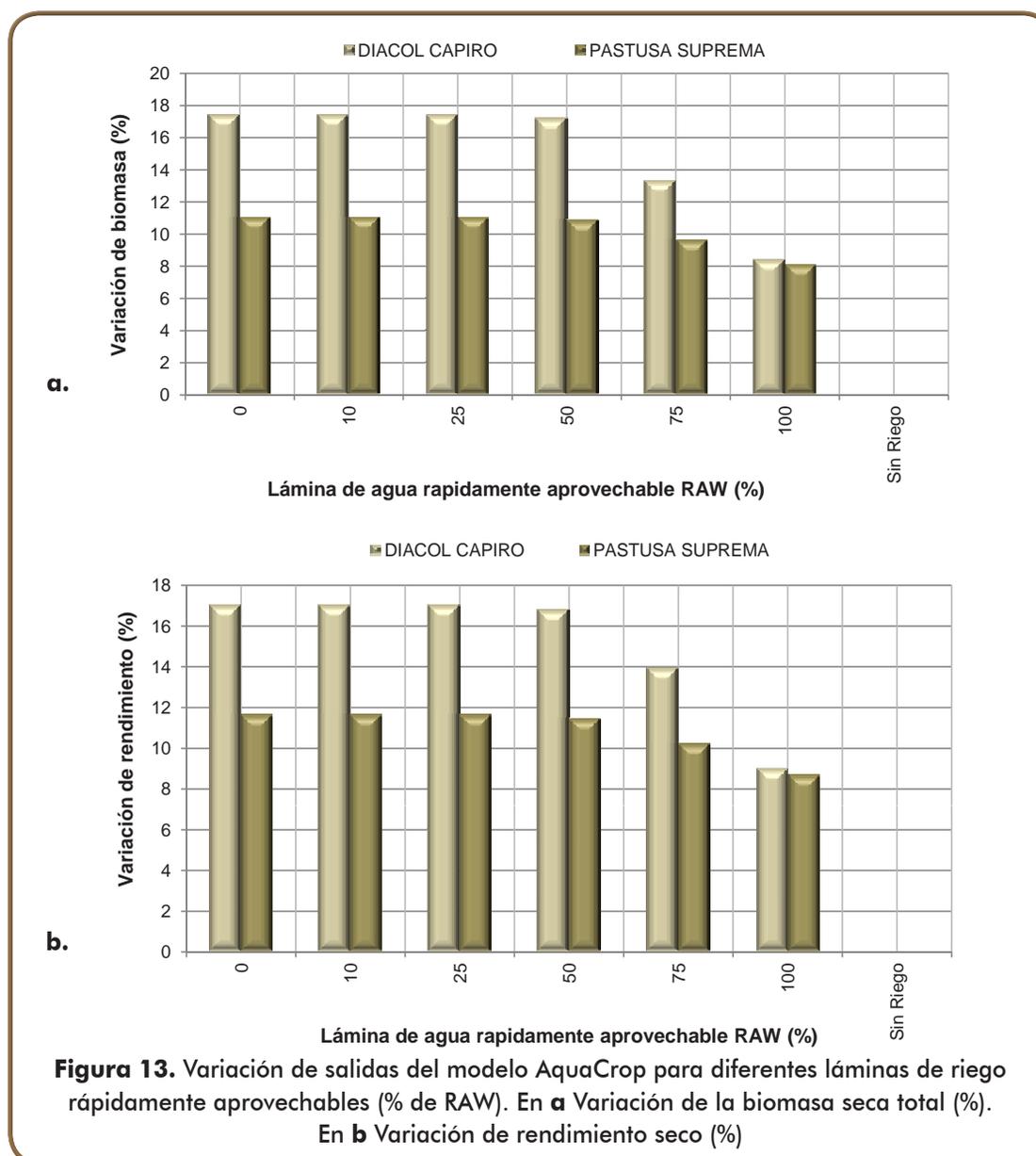
Es importante anotar que para el periodo de ajuste del modelo AquaCrop (segundo semestre del año 2004), la siembra y cosecha del tubérculo, se vieron afectadas por el fenómeno del niño en sus etapas de inicio y desarrollo; en el 2005 se registró la maduración de este fenómeno de variabilidad climática interanual. Según IDEAM (2005) para el país se presentaron sequías (precipitaciones por debajo del promedio) desde Junio de 2004 y Febrero de 2005, lo que se evidenció en reducciones de precipitación de más de 100mm en las zonas objeto de estudio (Zipaquirá, Mosquera y Tunja). Lo anterior se ratificó al observar el déficit hídrico y las disminuciones de producción causadas por estrés que sufrieron las variedades objeto de análisis.

4.3. Análisis de sensibilidad

4.3.1. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes aplicaciones de riego

Se inició por explorar el funcionamiento e interpretación que el modelo AquaCrop hace de la cantidad de agua disponible en la zona radicular, la cual está en función de las láminas de riego aplicadas. Esta aplicación de riego puede generarse en función de la disminución del contenido de agua en el suelo medido como un porcentaje de lámina de agua rápidamente aprovechable (RAW) o de acuerdo al conocimiento empírico de los cultivadores que a su vez depende de las prácticas de manejo de cada cultivo y cada zona. Se graficó entonces el comportamiento de la variación en productividad (figura 13) en función de diferentes cantidades de agua aplicada, que mantuvieran un grado de humedad constante en el suelo. Esta humedad se estima como porcentaje de la lámina de agua rápidamente aprovechable (RAW).

En la etapa de ajuste del modelo no se aplicaron láminas de riego, debido a que los datos experimentales se referían a un escenario Sin Riego.

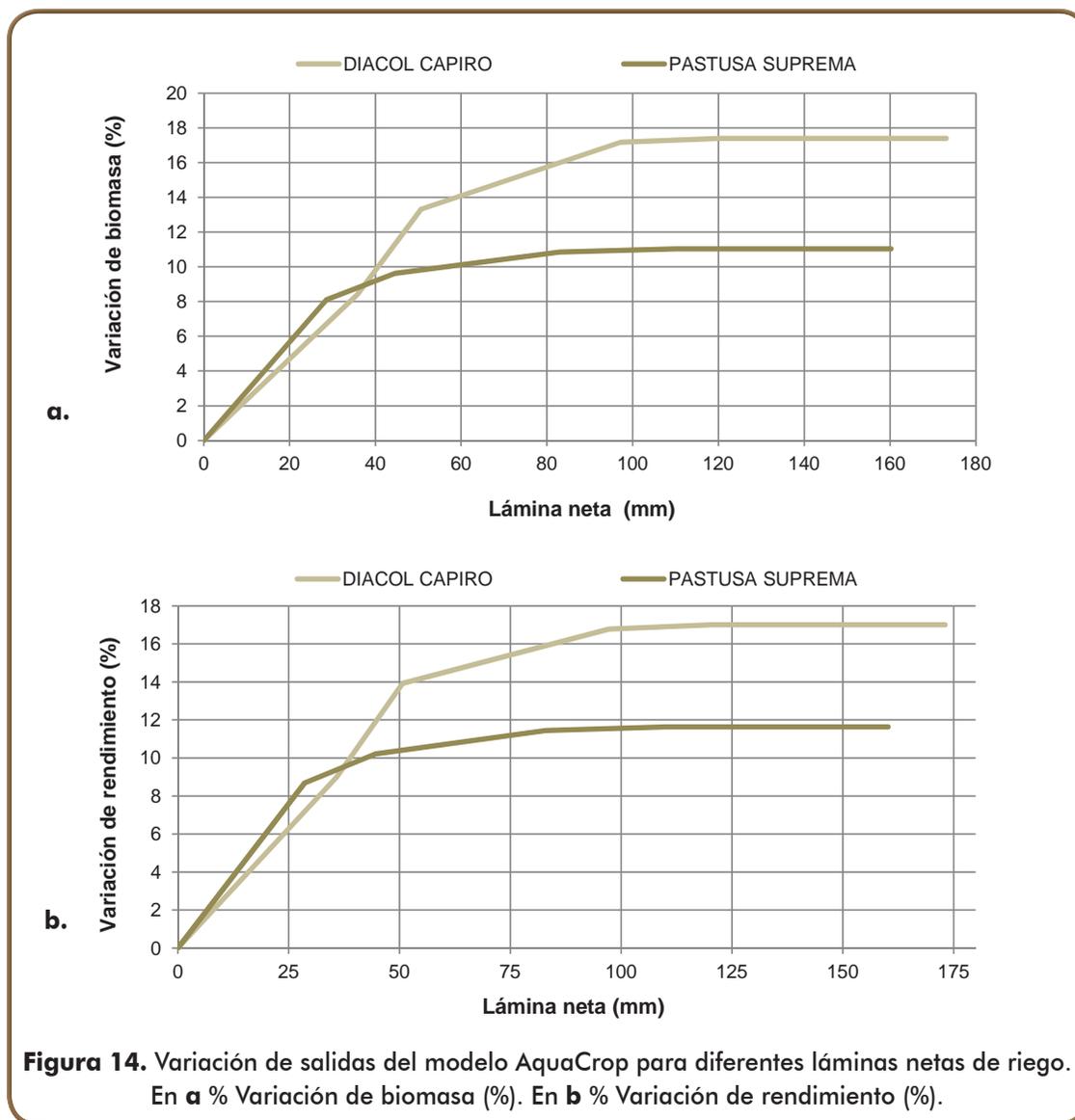


AquaCrop realiza balances hídricos internos con el fin de determinar las necesidades de agua para la planta y con base en el contenido de humedad, variables hidrofísicas, entre otras; simula el desarrollo, crecimiento y producción. En la figura 13, se puede observar que la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo es vital para el buen desarrollo de la planta. La aplicación de riego en el cultivo de la papa en el altiplano cundiboyacense permitiría aumentar los rendimientos de tubérculo en hasta un 11 % y 12 %, para Diacol Capiro y Pastusa Suprema respectivamente. En esta zona del país se reporta que sólo el 6% de los productores de papa utilizan alguna tecnología de riego (MAVDT, 2004).



Cuando se mantiene el límite de la humedad del suelo entre el 0 (Capacidad de Campo) y el 25% de RAW como criterio de aplicación de riego, no hay incrementos considerables en las salidas del modelo AQUACROP, por lo que se estaría sobre aplicando agua, perdiéndose esta lámina de riego en percolación profunda y escorrentía superficial.

En la figura 14 se estudia la variación de porcentajes de producción de biomasa y tubérculo seco (rendimiento) en función de la lámina neta de riego aplicada.



De la figura 14, se observa que con láminas netas equivalentes a 120.4mm (Diacol Capiro) y 110mm (Pastusa Suprema), se alcanzan los máximos rendimientos y salidas en biomasa. Lo anterior indica que para el cultivo de la papa no es necesario llegar a condiciones de capacidad de campo para obtener los mejores rendimientos.

4.3.2. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles freáticos

Se estudió la variación de la biomasa y el rendimiento seco respecto del nivel freático, o tabla de agua, a diferentes profundidades y los posibles efectos del ascenso capilar dentro del balance hídrico y por ende en la producción del cultivo (figura 15).

Se observó que a profundidades de nivel freático entre 0.5 y 1.5 metros existen efectos positivos en la producción (rendimiento) cercanos al 17% y 12%, respecto de las salidas halladas en la etapa de ajuste del modelo, para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema, respectivamente.

La profundidad de raíces para la papa en ambas variedades fue de 0.5m, por lo que cuándo más del 50% del perfil del suelo en la zona radicular estuvo saturado se disminuyó la producción. Para valores menores de 0.3 metros, la acumulación tanto de biomasa como de materia seca en el tubérculo se ve disminuida de manera gradual hasta obtenerse producción mínima (5-10% de los valores reportados en la etapa de ajuste). Lo anterior se observó para condiciones de encharcamiento (0 metros). Esto se debe a las condiciones anaerobias, la incapacidad de las raíces de capturar nutrientes, además del cierre estomático y reducción de la transpiración de la planta.

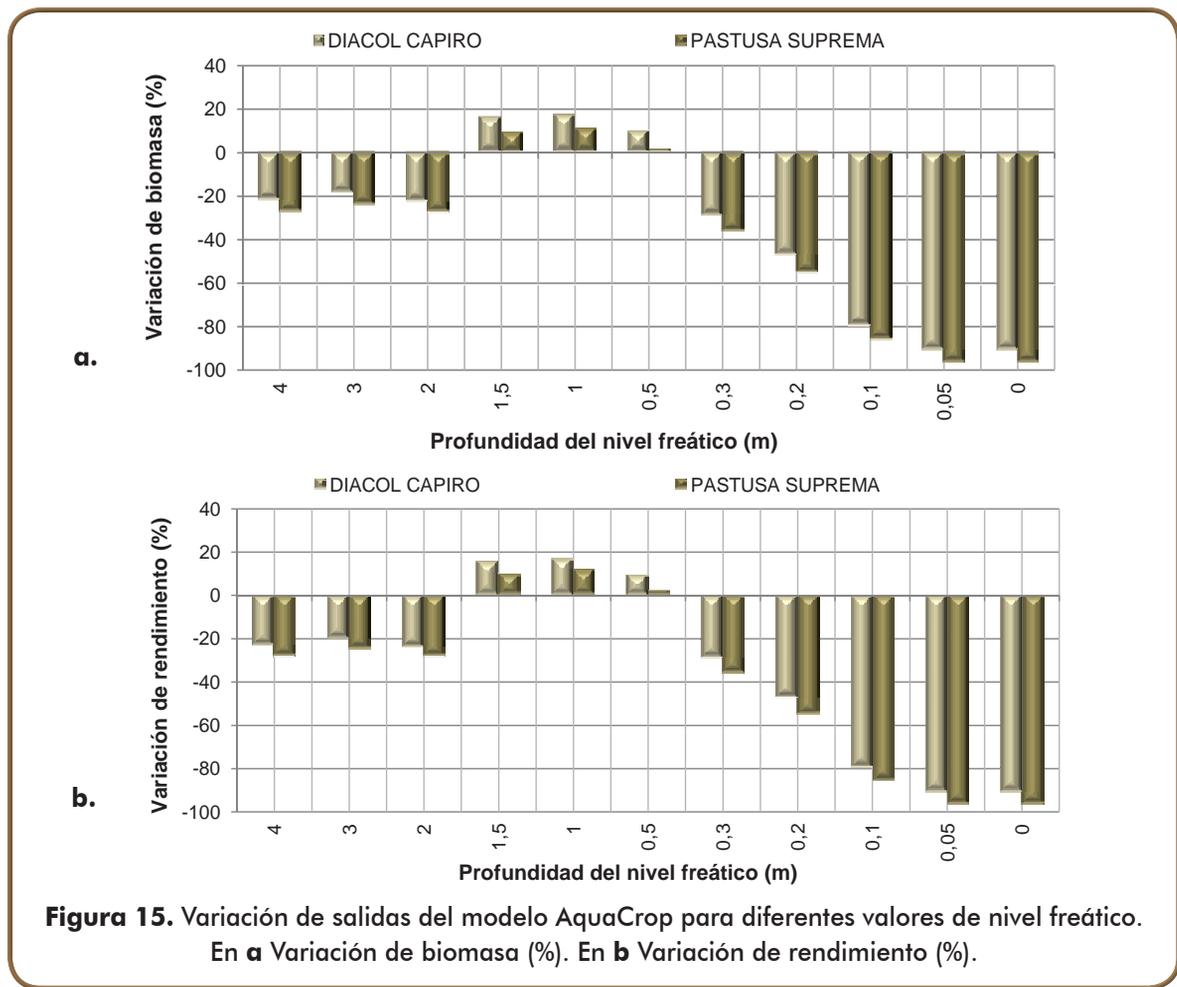


Figura 15. Variación de salidas del modelo AquaCrop para diferentes valores de nivel freático. En **a** Variación de biomasa (%). En **b** Variación de rendimiento (%).

Si se estudian los aportes de agua por ascenso capilar desde las diferentes profundidades a las que se encuentra el nivel freático, es posible observar que las mayores láminas se presentan a 0.5 metros de profundidad (Figura 16).

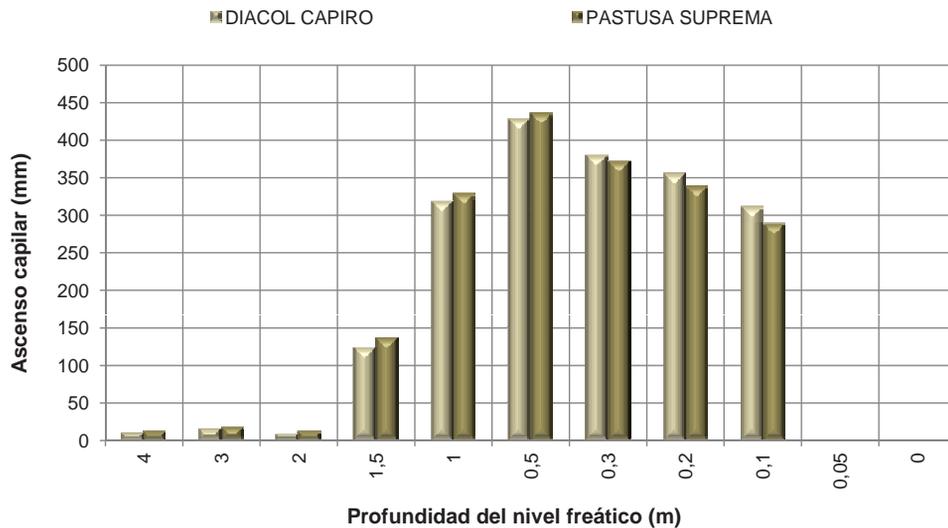
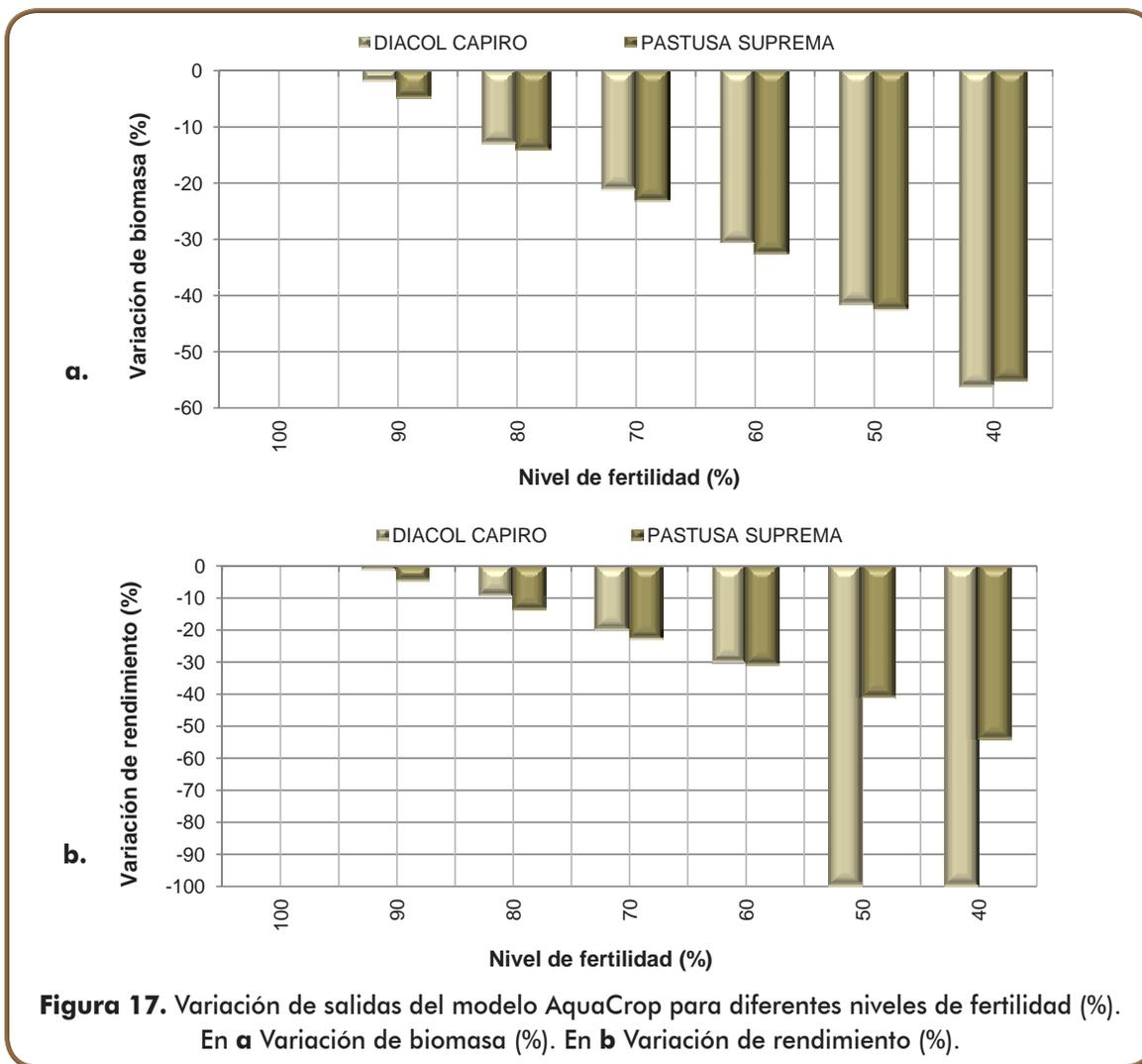


Figura 16. Aportes de agua por ascenso capilar en función de la profundidad del nivel freático

Para profundidades menores a 0.5 metros se empieza a observar una disminución gradual en producción, así sea que los aportes de agua por ascenso capilar sean importantes. Para profundidades menores a 5cm no existe ascenso capilar ya que el suelo se puede considerar como en punto de saturación.

4.3.3. *Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de fertilidad de suelos*

Las prácticas agrícolas condicionan los valores de producción de tubérculo, siendo el nivel de fertilización del suelo un factor que incide en la obtención de rendimientos óptimos. En la figura 17, se presenta la variación tanto de biomasa como de rendimiento en función de diferentes niveles de fertilidad (cabe anotar que en el proceso de ajuste se trabajó con un nivel de fertilidad del 100%). La herramienta AquaCrop, no realiza un balance de nutrientes, pues la parte de química de suelos se asimila a rangos de fertilidad. Por otra parte, hay que señalar la falta de información de química de suelos en el país y al poco seguimiento que realizan tanto productores como gremios de las características del suelo.



En el modelo AquaCrop la reducción de la fertilidad está directamente relacionada con la modificación de los parámetros de desarrollo del follaje, y en consecuencia con la producción de biomasa y rendimiento. En la figura 17, se observó que a medida que disminuye el nivel de fertilidad, la producción lo hace gradualmente. El comportamiento del porcentaje de variación de biomasa y rendimiento fue similar en los dos materiales estudiados (Diacol Capiro y Pastusa Suprema). Cuando el nivel de fertilidad fue del 40%, no se reportaron salidas de rendimiento para la variedad Diacol Capiro, debido a que internamente el modelo AquaCrop ajusta el parámetro de índice de cosecha a las condiciones de fertilidad, evitando que parte de la biomasa se convierta en producto cosechable. Para este mismo nivel de fertilidad (40%) la variedad Pastusa Suprema tuvo una reducción en rendimiento de hasta el 50%. Bajo este supuesto, el modelo pretende representar las condiciones de baja nutrición y por ende la incapacidad de la planta de tener un normal desarrollo.

Para tener una mayor certeza del grado de fertilidad del suelo, éste puede ser calibrado experimentalmente. En el manual del modelo AQUACROP (Raes *et al*, 2011) se menciona



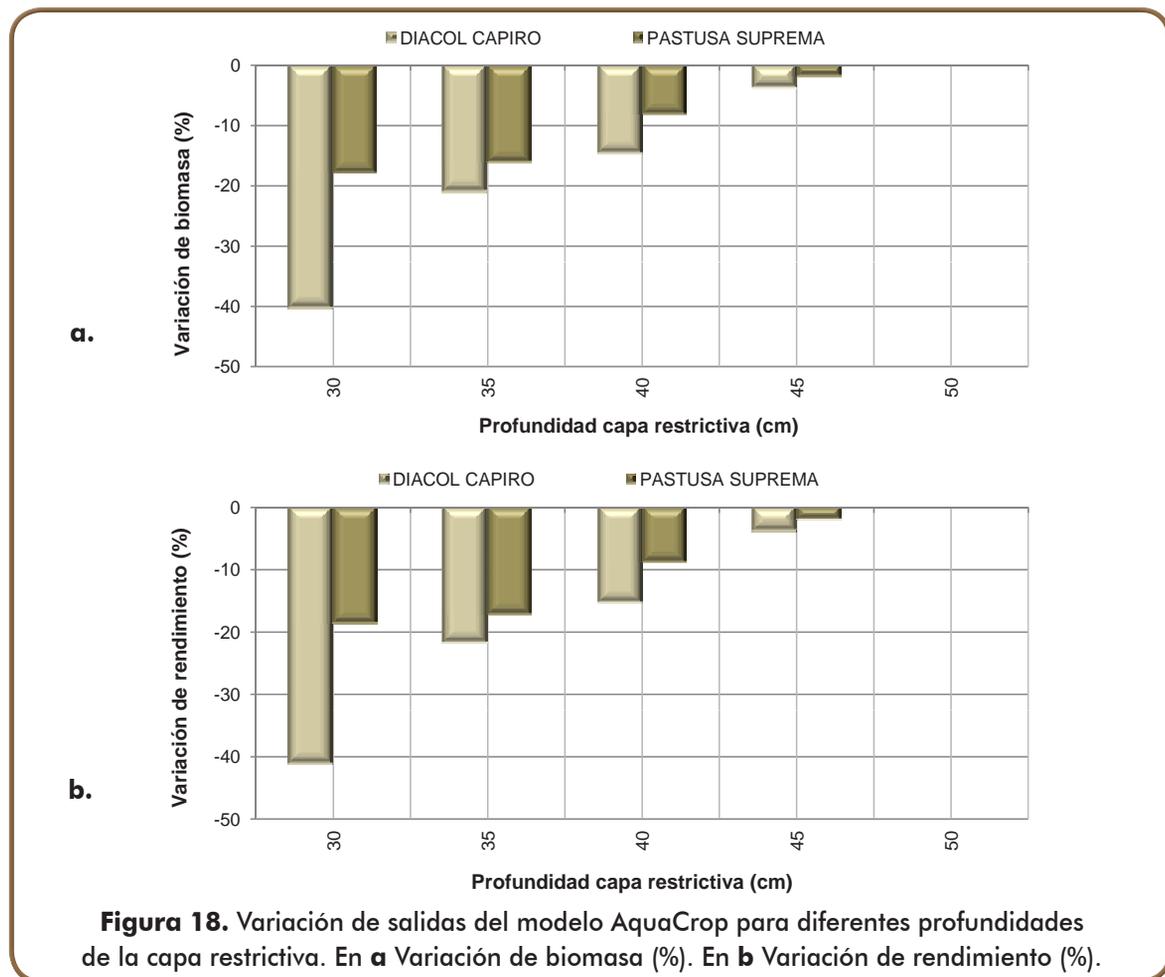


que la calibración del nivel de fertilidad se puede hacer estimando la biomasa en dos parcelas experimentales; la primera bajo condiciones óptimas de fertilización y la segunda bajo las condiciones de producción normal de la zona. La relación porcentual entre estas variables indicará la disminución de fertilidad, la cual es una entrada en el módulo de manejo de AQUACROP.

4.3.4. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes niveles de profundidad de horizontes restrictivos en el suelo

En el módulo de suelos se ingresan las características hidrofísicas y la posible presencia de capas restrictivas. Estas dos variables condicionarán el balance hídrico en el perfil del suelo, estando directamente relacionadas con la cantidad de agua total almacenada en la zona radicular.

Se evaluó entonces el efecto de capas compactas desde los 30 cm y se incrementaron cada 5 cm hasta alcanzar la máxima profundidad radicular. Para cada profundidad se simuló la biomasa y rendimiento del cultivo de la papa. En este sentido se estudió el efecto de capas impermeables que impidieran el normal desarrollo de las raíces (Figura 18).



Se encontró que horizontes restrictivos cerca de la superficie del terreno (30cm), disminuyen la biomasa hasta en un 40.4 % y 18 % para Diacol Capiro y Pastusa Suprema, respectivamente. Para la variable rendimiento las disminuciones son del orden de 41.2% (Diacol Capiro) y 18.7% (Pastusa Suprema). En general la variedad Diacol Capiro es más susceptible a disminuciones en comparación a Pastusa Suprema, debido a la presencia de capas compactas.

Cuando el horizonte restrictivo se encuentra a la misma profundidad que la máxima elongación de las raíces (50cm), no existe afectación en los valores de biomasa y rendimiento, es decir no inhibe su crecimiento y la cantidad de agua disponible para la planta no se ve reducida.

4.3.5. Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas de suelo

Respecto a las características hidrofísicas del suelo se simularon los valores de biomasa y rendimiento en diferentes texturas (figura 19). En la tabla 4 se presentan las características hidrofísicas de cada suelo utilizado en este análisis, las cuales se encuentran por defecto en el modulo de suelos de AquaCrop.

Tabla 4. Características hidrofísicas de las texturas evaluadas con el modelo AquaCrop

Textura	PMP (%)	CC (%)	SAT (%)	TAW ⁷ (mm/m)	Ksat ⁸ (mm/día)
Arenoso (Ar)	6	13	36	70	1500
Franco Arenoso (F-Ar)	10	22	41	120	500
Franco (F)	15	32	46	160	250
Franco Limoso(F-L)	13	33	16	200	150
Franco Arcilloso (F-a)	23	39	50	160	100
Arcilloso(a)	39	54	55	150	2

En cuanto al comportamiento de las simulaciones, se observó que la textura franca (F) permite un mejor desarrollo del cultivo, ya que la cantidad de agua almacenada y las tasas de infiltración permiten que las raíces absorban con mayor facilidad la cantidad de agua requerida para su desarrollo y a su vez se puedan anclar al terreno adecuadamente (esta fue la textura de referencia). Para esta textura se observó un aumento en biomasa de 15.1 % en la variedad Diacol Capiro y de 8.5 % en Pastusa Suprema. Los incrementos en producción de tubérculo estuvieron en los mismos órdenes de magnitud para las variedades analizadas. Para las demás texturas las salidas simuladas fueron siempre menores a las halladas en la etapa de ajuste. El valor de referencia utilizado fue un suelo franco pero que ha perdido propiedades físicas debido a su explotación.

[7] TAW: Agua Disponible Total en el Suelo (Total Available Soil Water)

[8] Ksat: Conductividad hidráulica saturada



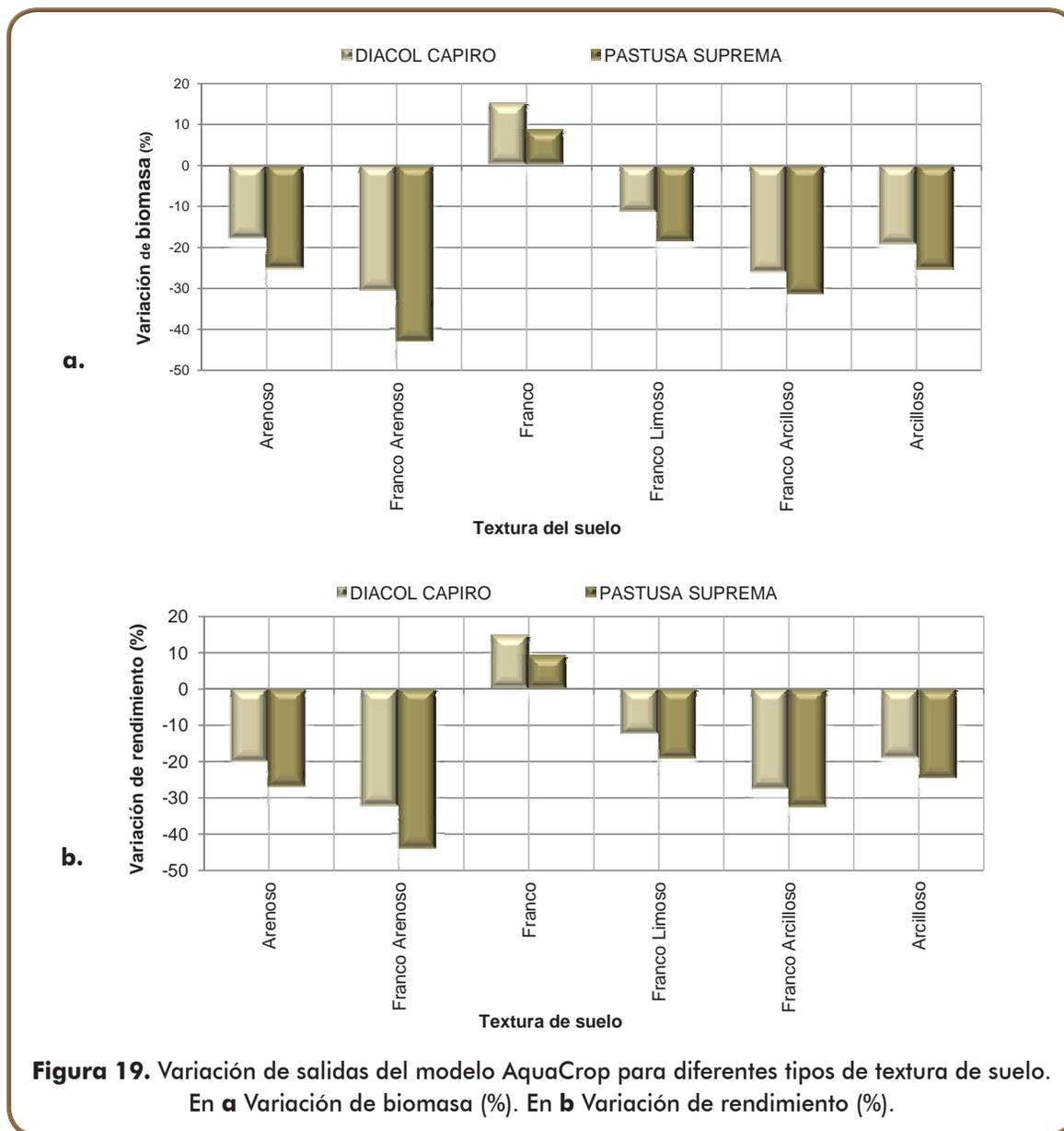


Figura 19. Variación de salidas del modelo AquaCrop para diferentes tipos de textura de suelo. En **a** Variación de biomasa (%). En **b** Variación de rendimiento (%).

Los suelos con fracciones de arenas disminuyen la productividad agrícola, debido a su baja capacidad de retención de humedad, siendo menor la cantidad de agua disponible para ser absorbida y posteriormente transpirada por la planta. Las mayores disminuciones se presentaron para la textura Franco Arenosa con valores mayores al 30.6% y 43.1% para Diacol Capiro y Pastusa Suprema, respectivamente en biomasa, y de 32.4% y 44.2% en tubérculo para estas variedades. En el caso de las texturas arcillosas el parámetro que afecta las salidas de biomasa y rendimiento es la conductividad hidráulica saturada, la cual al ser baja impide el libre movimiento del agua en el perfil del suelo.

Para este análisis de susceptibilidad del modelo AquaCrop se deben considerar como variables importantes la disponibilidad de agua, el grado de fertilidad del suelo y las características hidrofísicas del suelo. Las láminas de riego y los posibles aportes por ascenso capilar modifican de manera importante los valores de producción. De igual forma las disminuciones en el porcentaje de fertilidad del suelo tienen una relación directa con la biomasa y el rendimiento de papa.

4.4. Validación

Los modelos son generalmente definidos como una simplificación o abstracción de un sistema real. Este es particularmente el caso de sistemas biológicos, como los cultivos, donde la realidad está compuesta de muchos componentes y procesos interactuando sobre un amplio rango de niveles organizacionales (Sinclair and Seligman 1996 citados por Raes et al, 2009). La tabla 5 presenta los resultados de las validaciones llevadas a cabo en los municipios de Mosquera y Tunja.

Tabla 5. Validación del modelo AquaCrop para papa

Municipio	Mosquera - Cundinamarca		Tunja - Boyacá	
Variedad	Diacol Capiro	Pastusa Suprema	Diacol Capiro	Pastusa Suprema
Fecha de Siembra	06/07/2005	06/07/2005	06/07/2005	06/07/2005
Fecha de cosecha	27/11/2005	03/07/2005	26/11/2005	03/12/2005
Condición inicial de humedad	Capacidad de campo			
Rendimiento potencial (t*ha ⁻¹)	11.626	9.9 - 11.25	8 - 10	9.9 - 11.25
Rendimiento simulado (t*ha ⁻¹)	11.568 (Riego) 10.922 (Sin Riego)	11.741 (Sin Riego)	7.46 (Sin Riego)	8.017 (Sin Riego)

De acuerdo a los resultados se puede indicar que el módulo de cultivo adaptado para la zona de Zipaquirá en Cundinamarca, representa de forma adecuada el valor del experimento de Mosquera para la variedad Diacol Capiro. A su vez los resultados de las otras simulaciones se encuentran cerca de los rangos potenciales para los demás municipios y variedades analizadas.

4.5. Simulación de escenarios de Variabilidad y Cambio Climático

Los umbrales climáticos para los cuales la papa puede presentar un rendimiento adecuado son: rango de temperatura base entre 10 °C a 15 °C y de precipitación entre 500 a 2500 mm*año⁻¹, (Segura, Santos & Ñuztes, 2006).

En las siguientes subsecciones se presentan los resultados de la aplicación del modelo AquaCrop a los fenómenos de variabilidad y cambio climático. El comportamiento de los rendimientos del cultivo de papa está determinado por los cambios climáticos en relación con los rangos óptimos mencionados anteriormente.

4.5.1. Posibles efectos de la variabilidad climática sobre la papa

Se simularon los rendimientos agrícolas (peso de tubérculo seco), donde se discriminó el semestre agrícola (figura 20) y la fase ENSO (figura 21) que pudiera afectar los rendimientos de cultivo, para los municipios de Mosquera y Tunja, en las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema. En las graficas siguientes se presenta el valor promedio de las simulaciones en función del escenario.

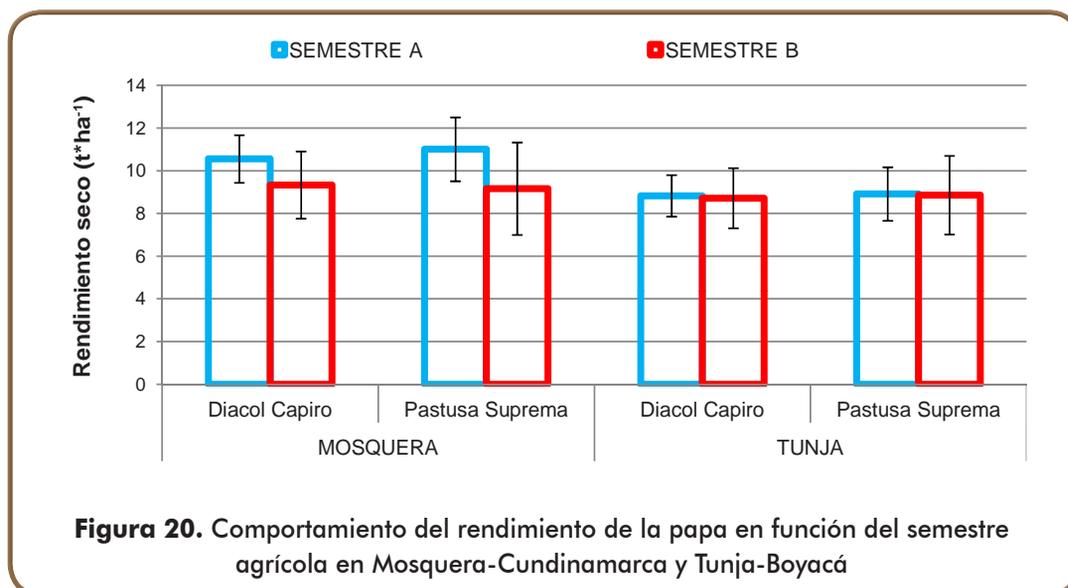


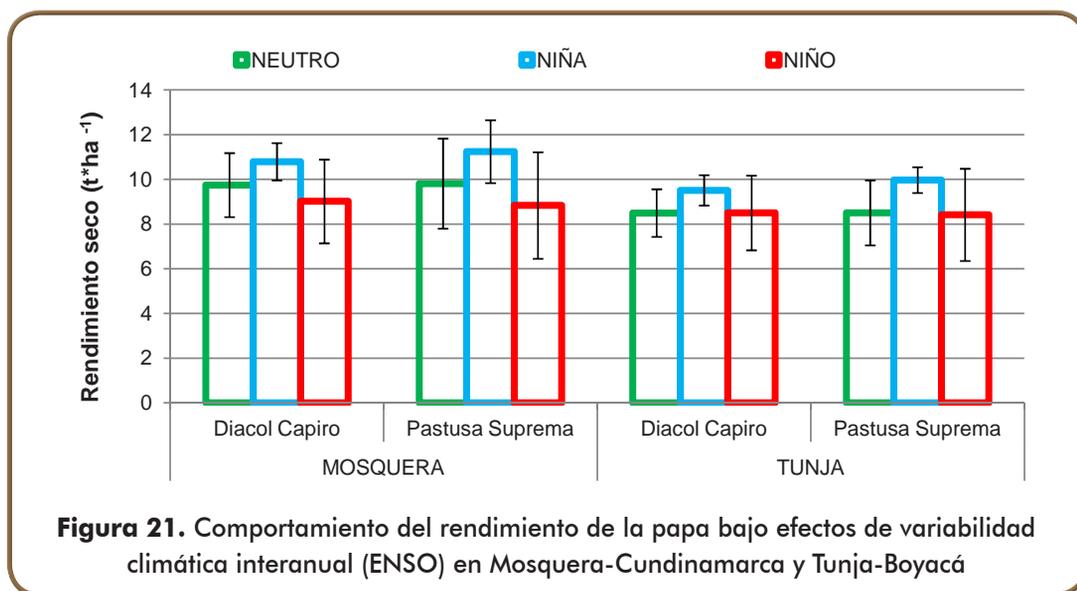
Figura 20. Comportamiento del rendimiento de la papa en función del semestre agrícola en Mosquera-Cundinamarca y Tunja-Boyacá

En la figura 20 se observa que para el municipio de Mosquera los mejores rendimientos se obtuvieron en el primer semestre del año, lo que coincide con las prácticas culturales en la zona, donde el mayor porcentaje de área en el altiplano cundiboyacense se siembra en este semestre, gracias a las condiciones climatológicas óptimas para el desarrollo del cultivo. En la variedad Diacol Capiro se reportan valores promedio para el semestre A de 10.55 t*ha⁻¹ y de 9.33 t*ha⁻¹ para el semestre B. Para la variedad Pastusa Suprema los valores promedio de rendimiento de tubérculo seco son de 11.00 t*ha⁻¹ en el semestre A y de 9.16 t*ha⁻¹ en el semestre B.

De esta misma figura se analizó que las diferencias en productividad entre los semestres agrícolas para el municipio de Tunja no son muy notorias, lo que podría indicar que la disponibilidad hídrica es similar en los dos semestres agrícolas, pero inferior a la existente en Mosquera. También podría existir alguna presencia de corrientes de aire procedentes del piedemonte llanero, lo que podría regularizar los efectos de la variabilidad climática intranual debida al paso de la ZCIT por esta parte del territorio Colombiano. La producción de tubérculo para esta zona es de 8.33 t*ha^{-1} en promedio, lo que podría estar regulado por la longitud de los ciclos fenológicos, los cuales están en función de los Grados Día Acumulados (GDD) estimados en la etapa de ajuste del modelo.

Para las dos localidades, en el semestre agrícola B se observa una mayor dispersión en las salidas simuladas de rendimiento seco, lo que está asociado con una mayor irregularidad en la distribución de lluvias, y por ende los periodos con déficit hídrico.

Para el caso de variabilidad climática interanual (figura 21), los periodos de cultivo que se vieron afectados por fenómenos de la Niña obtuvieron una mayor productividad seguidos por los Neutros y por último los afectados por la fase Niño. Lo anterior se explica en la disponibilidad hídrica para cada fase, viéndose claramente que en fase Niña los aportes de precipitación son mayores en comparación a la fase Niño, donde existe déficit hídrico.



Es importante recordar que el modelo AquaCrop responde a la disponibilidad de agua en la zona radicular de manera positiva en términos del rendimiento seco de tubérculo, lo que explica las salidas de la figura 21. Para la fase Niña se reporta una producción promedio máxima de 11.24 t*ha^{-1} para la variedad Pastusa Suprema en el municipio de Mosquera, y para la fase Niño un rendimiento mínimo promedio de 8.41 t*ha^{-1} de la misma variedad en Tunja.



Al comparar las salidas de producción afectadas por la fase Niña con los promedios de las otras demás fases del fenómeno ENSO, se tiene que con respecto a la fase Niño, la producción es mayor en 1.69 t*ha^{-1} y con respecto a la fase Neutro, es mayor en 1.24 t*ha^{-1} .

En general, para el municipio de Tunja se reportaron valores inferiores a los obtenidos para Mosquera, debido a que los requerimientos hídricos son mayores para este municipio, es decir, la precipitación es menor y la evapotranspiración de cultivo es mayor, lo que disminuye la producción de biomasa internamente en el modelo. A lo anterior se suma la carencia de una tecnología de riego que satisfaga las necesidades hídricas del cultivo.

De manera complementaria se analizó la duración del ciclo vegetativo en función de los escenarios de variabilidad climática intra (figura 22) e interanual (figura 23) en el altiplano cundiboyacense. Teniendo en cuenta que las corridas se realizaron con la fenología del cultivo determinada por los Grados Día Acumulados (GDD) estimados en la etapa de ajuste, se procedió a determinar la longitud del ciclo para los municipios de Mosquera y Tunja.

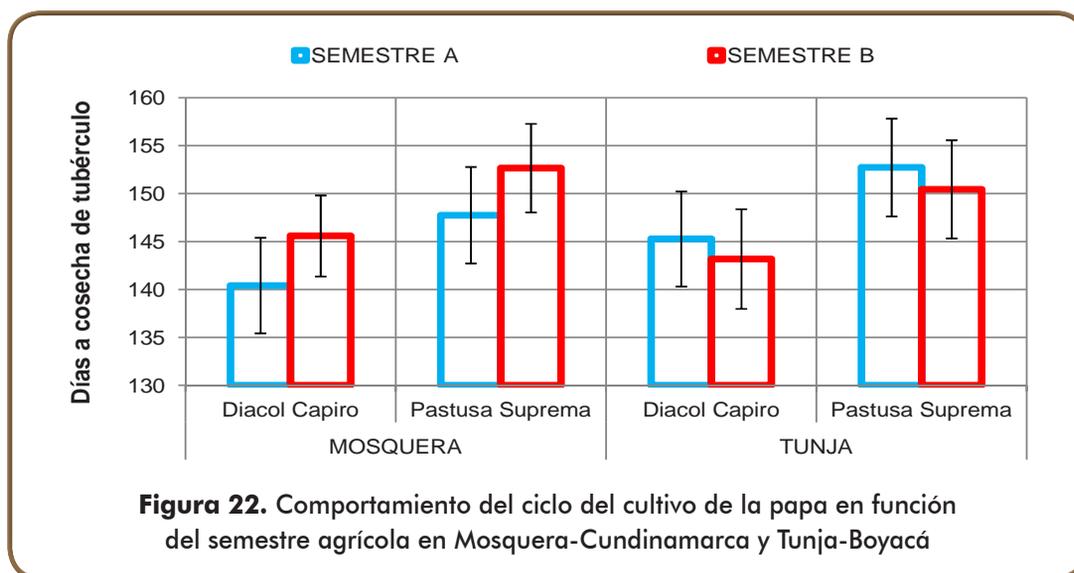
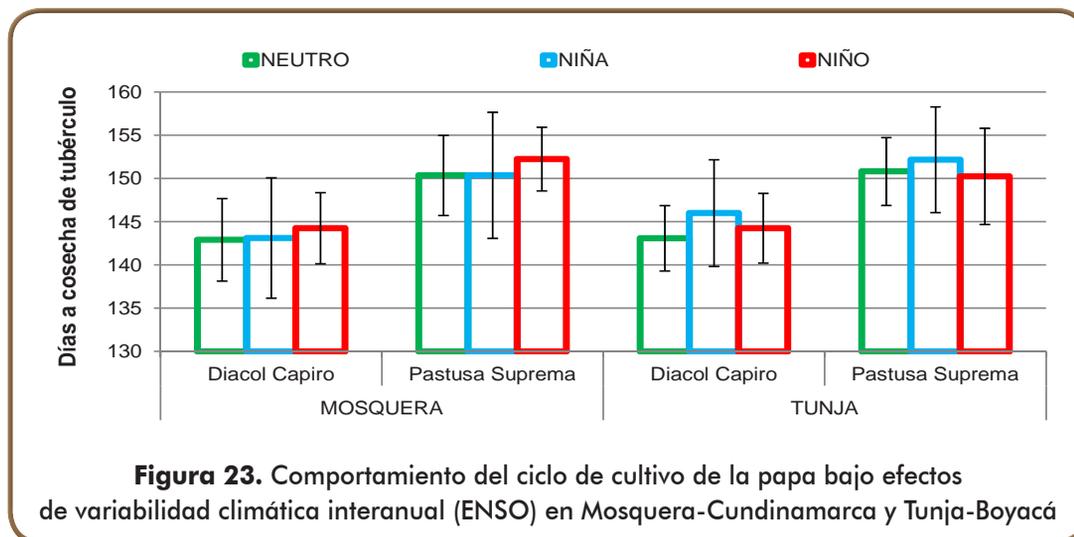


Figura 22. Comportamiento del ciclo del cultivo de la papa en función del semestre agrícola en Mosquera-Cundinamarca y Tunja-Boyacá

De la figura 22 se observó que para el municipio de Mosquera los ciclos de cultivo en el semestre A son más cortos que en el B, caso contrario a Tunja, donde los ciclos más largos se producen en el semestre agrícola A. El máximo ciclo de cultivo se estimó para la variedad Pastusa Suprema en los municipios de Mosquera (semestre B) y Tunja (Semestre A), con una duración de 153 días, y el ciclo más corto fue para Diacol Capiro en Mosquera-Cundinamarca para el semestre A, con una duración de no más de 140 días.

Si se compara la duración del ciclo vegetativo para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema entre Mosquera y Tunja, se estima una diferencia de 5 días menos en el semestre A y de 3 días más para el semestre B, entre la primera y la segunda zona.

Según las posibles afectaciones del fenómeno ENSO (figura 23) en la duración del ciclo vegetativo de la papa para las variedades estudiadas, se observó que en promedio para el municipio de Mosquera, sin importar la fase, no existen variaciones significativas en la longitud del ciclo, con una duración promedio de 143 días para la Diacol Capiro y de 150 días para Pastusa Suprema.



En el caso de Tunja los ciclos afectados por la fase Niña (146 días-DC y 152 días-PS) fueron más largos en comparación con los Neutros (143 días-DC y 151 días-PS) y Niños (142 días-DC y 148 días-PS), los cuales fueron los más cortos. Lo anterior se explica por el aumento de las temperaturas máximas y disminución de las temperaturas mínimas en las madrugadas, cuando existe efecto de la fase Niño del fenómeno ENSO.

De este ejercicio se concluye que los efectos tanto de variabilidad climática inter como intra anual afectan los valores de producción de tubérculo seco y modifican los ciclos de cultivo de la papa en la zona del altiplano cundiboyacense. En general los ciclos de cultivo afectados por fenómenos que generen una mayor oferta hídrica mejoran las condiciones de desarrollo y por ende de producción, tales son los casos del ENSO en fase Niña y el paso de la ZCIT en el primer semestre agrícola del año.

4.5.2. Posibles efectos del cambio climático sobre la papa

En el primer escenario se estimaron láminas para la variedad Diacol Capiro, las cuales variaron entre 180-210mm y 210-260mm para Mosquera y Tunja, respectivamente. Para la variedad Pastusa Suprema estos rangos estuvieron entre 190-220mm y 230-270mm para los municipios objeto de análisis. Las variaciones de rendimiento en relación con las simulaciones realizadas para la media climática 1981-2010, se observan en la Figura 24.

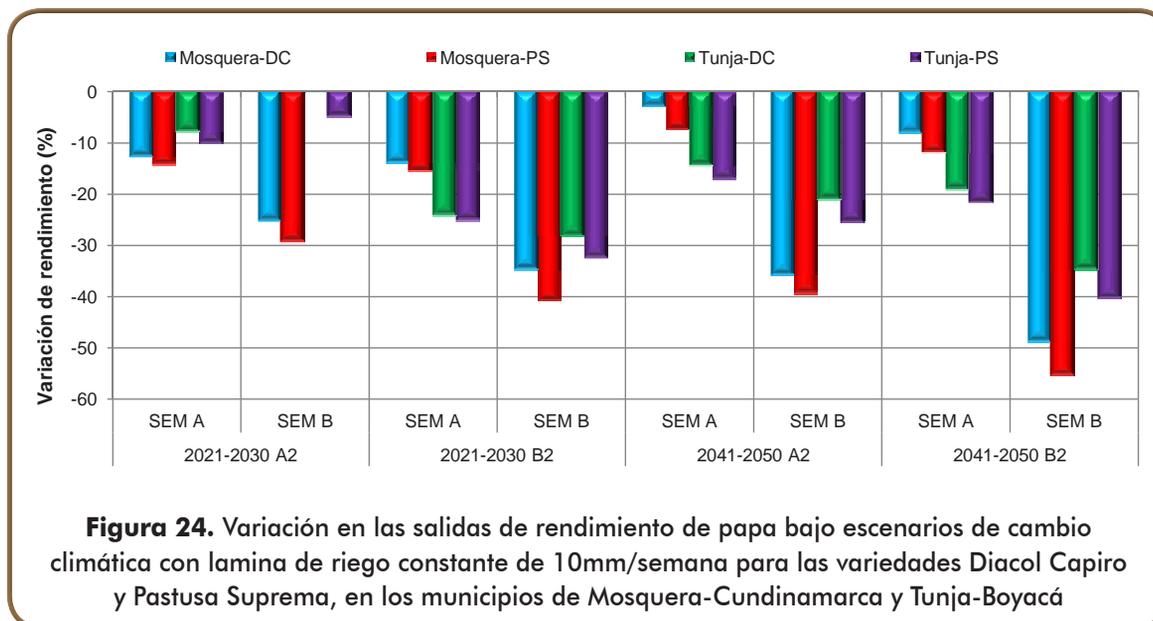


Figura 24. Variación en las salidas de rendimiento de papa bajo escenarios de cambio climática con lamina de riego constante de 10mm/semana para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema, en los municipios de Mosquera-Cundinamarca y Tunja-Boyacá

Para todos los casos se observaron disminuciones en la producción de tubérculo seco, siendo más drástico en el segundo semestre agrícola del año (B). También se observó una disminución a medida que el escenario climático tiene un horizonte de tiempo más lejano a la media climática. Si comparamos entre medias climáticas, el escenario A2 (pesimista) reportó menores disminuciones que el B2; lo anterior se debió al ajuste que realiza automáticamente la herramienta AquaCrop del parámetro de productividad hídrica (Water Productivity WP), el cual relaciona de forma directa la transpiración con la producción de biomasa seca. La herramienta AquaCrop tiene dentro de su base de datos las salidas de SRES-IPCC para los escenarios en mención, y ajusta este parámetro, el cual está normalizado por la concentración de CO₂ del año 2000; esto quiere decir que, para escenarios con una mayor proyección de concentraciones de dióxido de carbono, mayor será el WP y por ende la producción de biomasa y rendimiento del cultivo.

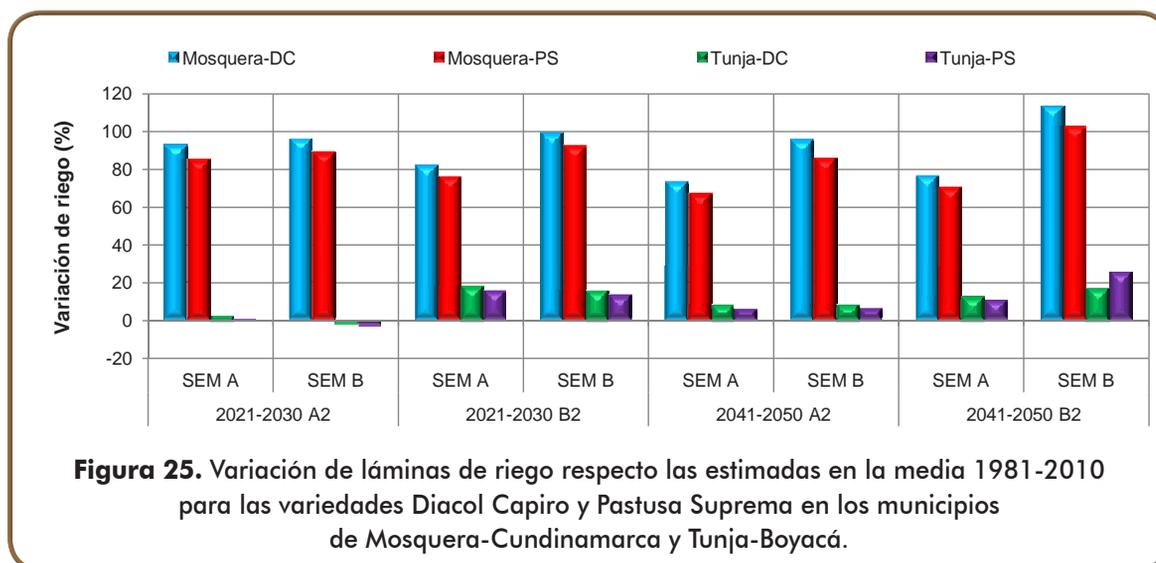
En el segundo escenario se estimaron las láminas requeridas por el cultivo bajo los escenarios climáticos que mantuviera constante la humedad del suelo a una humedad igual al 50% de la lamina de agua rápidamente aprovechable y que mantuvieran la producción de tubérculo con variaciones en sus salidas inferiores al 10%, respecto los simulados para la media climática 1981-2010 (tabla 6).

Respecto a la media climática 1981-2010, se observó que los requerimientos hídricos para la zona de Tunja son mayores a los de Mosquera, debido a que el rango de temperaturas máximas y mínimas es más amplio, lo que sumado a una mayor insolación se traduce en una evapotranspiración de cultivo más alta, y por ende en una lamina de riego mayor.

Tabla 6. Láminas de riego estimadas que mantuvieran 50% RAW en el suelo y variaciones en producción inferiores al 10%.

Escenarios	Semestre	Mosquera (mm)		Tunja (mm)	
		Diacol Capiro	Pastusa Suprema	Diacol Capiro	Pastusa Suprema
1981-2010	A	160.8	184.1	275.5	292.2
	B	190.9	212.9	278.1	295.7
2021-2030 A2	A	295.6	325.7	266.8	290.2
	B	391.9	422.3	348.2	371.6
2021-2030 B2	A	280.2	309.7	306.4	331.6
	B	409.3	440.6	396.8	424.5
2041-2050 A2	A	295.2	326.2	311.5	337.3
	B	431.6	466.5	387.9	414
2041-2050 B2	A	284.5	315.3	313.8	340.2
	B	462.6	501.8	411.6	439.6

En el municipio de Mosquera se estimaron requerimientos hídricos mayores comparados a los de Tunja en términos porcentuales (figura 25), lo que es un indicador que esta zona del país podrá ser mucho más vulnerable a los efectos del cambio climático. Se observó que los requerimientos para el caso de Mosquera, son en general mayores para el segundo semestre del año y para los escenarios B2.



Con la intención de identificar los efectos del cambio climático en la longitud del periodo vegetativo de la papa, se estimó la duración del ciclo de cultivo en días calendario, para los municipios de Mosquera-Cundinamarca y Tunja-Boyacá (Figura 26).

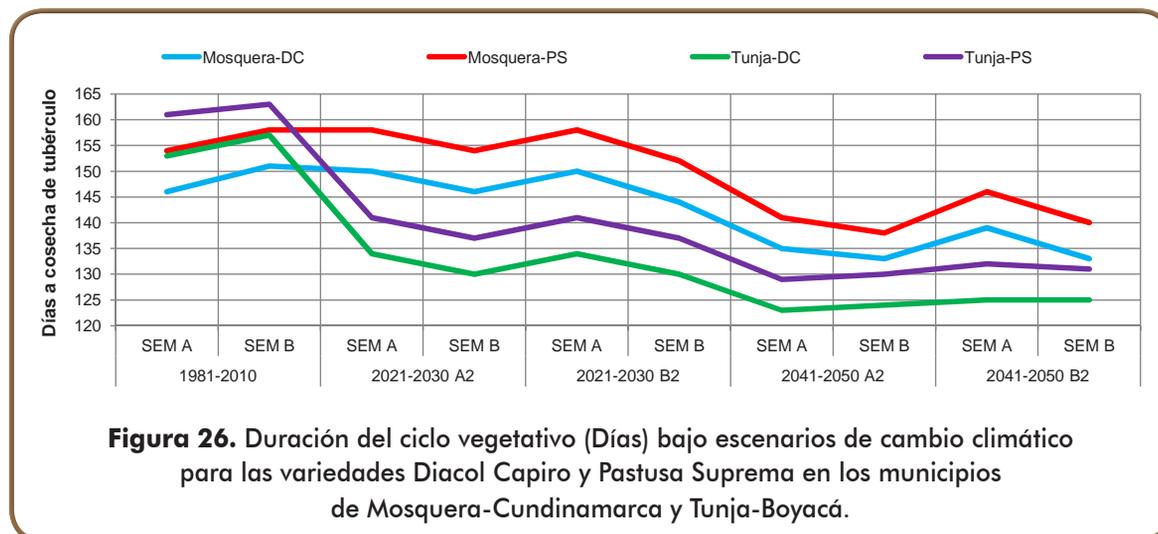


Figura 26. Duración del ciclo vegetativo (Días) bajo escenarios de cambio climático para las variedades Diacol Capiro y Pastusa Suprema en los municipios de Mosquera-Cundinamarca y Tunja-Boyacá.

Se utilizaron los mismos grados día acumulados utilizados en la etapa de validación y en los escenarios de variabilidad climática, los cuales correspondían a 1650 GDD para Diacol Capiro y 1734 GDD para Pastusa Suprema.

Cuando se comparó la media climática histórica con los escenarios de cambio climático, se observó una disminución en los ciclos vegetativos, siendo esto indicativo de un aumento en la temperatura media del aire, lo que según el análisis de GDD provee una mayor capacidad de la planta de generar cambios morfogénicos, alcanzando sus etapas fenológicas precozmente. En Mosquera se observó que los ciclos son más largos en el semestre A que en el semestre B. Respecto a las zonas, se distingue claramente que en Tunja los ciclos vegetativos son más cortos en comparación con Mosquera. Las variedades de papa analizadas guardan sus diferencias originales, siendo el ciclo vegetativo de la Pastusa Suprema de una duración mayor a la Diacol Capiro.

Según los escenarios de cambio climático analizados y los ciclos vegetativos estimados, se puede decir que en la zona de Mosquera la longitud del periodo vegetativo puede disminuirse hasta en 20 días y en Tunja hasta en un mes.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados presentados en esta cartilla sugieren que el modelo AquaCrop presenta similitud con los resultados del rendimiento de tubérculo de las variedades del cultivo de papa evaluadas en las zonas productoras bajo estudio. El modelo AquaCrop es una buena herramienta para la simulación de cultivo y para el diseño de estrategias en la toma de decisiones frente a los efectos de la variabilidad y cambio climático, o para optimizar la productividad del cultivo.

Se observó alta sensibilidad del modelo a la lámina de agua disponible en la zona radicular, lo que sumado a las prácticas de fertilización condicionan en un alto grado las salidas del modelo AquaCrop. Es entonces importante realizar un seguimiento concienzudo de estas variables para reducir la incertidumbre en las salidas del modelo.

Los resultados indican que los fenómenos de variabilidad climática inter-anual (Fenómeno ENSO) e intra-anual (ZCIT), tienen influencia en el desarrollo y rendimiento agronómico del cultivo de papa en el altiplano cundiboyacense. Según la base teórica del modelo AquaCrop la disponibilidad de agua determina las salidas de rendimiento de tubérculo seco, por lo que para años con influencia de la fase Niña del ENSO, se simularon mayores rendimientos. Caso contrario se presentó en fase Niño, donde las producciones disminuyeron respecto los rendimientos estimados para años Neutros.

El modelo puede entonces convertirse en una herramienta útil para elegir apropiadamente fechas idóneas de siembra, para la toma de decisiones de adaptación a los fenómenos (variabilidad climática) ambientales y antropógenos (precios, demanda, oferta).

Bajo escenarios de cambio climático se observó que es importante iniciar con una transferencia de tecnología de riego masiva hacia el sector papero, ya que según estos escenarios, en un futuro los déficits hídricos serán mayores y no será posible suplirlo con el agua de precipitación. A lo anterior se sumó la evidencia de una posible reducción de los periodos vegetativos debido al incremento de las temperaturas en las zonas. Es importante entonces relacionar este posible fenómeno con las futuras zonas de confort agroclimático para el cultivo de la papa.

Si bien en esta primera aproximación a la predictibilidad del modelo AquaCrop se ha observado que los resultados simulados no están muy lejanos de los valores reportados en las zonas y variedades estudiadas, se hace necesario, para tener una mayor certeza del funcionamiento del modelo, llevar a cabo un registro juicioso de los rendimientos, discriminando por material cosechado, así como iniciar con un registro de las fechas de siembra y de cosecha.





A lo anterior se suma una mayor diversificación de estaciones agrometeorológicas en las zonas productoras con la intención de llegar a una zonificación agroclimática, que permita identificar como los efectos de las condiciones locales están afectando el comportamiento del cultivo, y de esta forma iniciar con el diseño de un sistema de alertas tempranas que permita tomar decisiones y acciones en el caso de eventos extremos.

Es importante recordar que el modelo AquaCrop realiza ajustes internos cuando se presentan excesos de agua en la zona radicular, pero para tener una mayor certeza del comportamiento del cultivo, es necesario realizar una etapa experimental donde se hallen los umbrales propios de la herramienta de modelación para las variedades sembradas en el país.

Como ejercicio complementario al que se realizó con los escenarios de cambio climático, se recomienda utilizar técnicas estadísticas de desagregación de series del nivel mensual al diario, teniendo en cuenta las series temporales simuladas, con la intención de representar con una menor incertidumbre los rendimientos del cultivo.

Bibliografía

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. N° 56). Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje 56. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. FAO.
- CCI-MADR. (2010). *Sistema de Información de Precios de Insumos y Factores*. Bogotá D.C: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Corporación Colombia Internacional. Cálculos Corporación Colombia Internacional.
- Corchuelo, G. (2005). I Taller Nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa. *Ecofisiología de la papa* (págs. 13-16). Bogotá: CEVIPAPA-Consejo Nacional de la Papa.
- Corpoica. (2010). *Escalas Fenológicas de las variedades de Papa parda pastusa, Diacol Capiro y Criolla "Yema de Huevo" en las zona productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia*. Bogota D.C: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica. CI Tibaitatá.
- DANE. (2011). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Bogotá D.C: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)- Dirección de Metodología y Producción Estadística (DIMPE).
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. N° 56). Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje .
- Fereres, E. (2012). *Curso Teorico Practico- Uso del Modelo AQUACROP*. Bogotá D.C.
- Fernández, M. (2009). *Efecto del fenómeno el niño en el agro sistema de papa y sus impactos socioeconómicos en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá para el periodo de 1976-2006*. Bogotá D.C: UNIVERSIDAD DE NACIONAL DE COLOMBIA, FACULTAD DE CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS.
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogota D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *2° Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –Ideam–.
- IPCC. (1996). *Guideline for National Greenhouse Gas Inventories*. Obtenido de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html>
- IPCC. (2000). *SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS*. A Special Report of IPCC Working Group III: Summary for Policymakers.

- MAVDT. (2004). *Guía Ambiental para el cultivo de la Papa*. Bogota D.C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial-Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible.
- Montealegre. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Informe Final contrato 022 - 2009. IDEAM.
- Montealegre, J. (2007). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia*. Informe Final contrato 063-2007. IDEAM.
- Ñústez, C. (2011). *Varietades colombianas de papa*. Facultad de Agronomía. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Pabón, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia- CAR.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Journal of Agronomy*, 438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2011). *Aqua Crop version 3.1 plus. Reference Manual*. Rome, Italy: FAO, Land and Water Division.
- Rojas, E. (2011). *Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogota*. Bogota D.C: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Maestría en Meteorología.
- Ruiz, F. (2010). *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100)*. IDEAM-METEO, Bogotá D.C.
- Santos, M., & Segura, M. (2005). *Evaluación de variables fisiológicas y componentes de rendimiento en cuatro variedades y dos clones avanzados de papa (Solanum tuberosum L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca)*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Segura, Santos, & Nústez. (2006). Desarrollo fenológico de cuatro variedades de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca). *Fitotecnia Colombiana*, 6(2), 33-43.
- Terán, C. (2006). *Determinación de requerimientos hídricos para la producción de dos variedades de papa industrial en la Sabana occidente de Bogotá*. C.I Tibaitata: Coporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA.

Anexo

ADAPTACIÓN DEL MODELO AQUACROP

Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad		Variable	Parámetro		Fuente
			Diacol Capiro	Pastusa Suprema		Conser-vativo	No Conser-vativo	
CLIMA	PRECIPITACIÓN	Precipitación	La Cosecha 2004		X			IDEAM
	TEMPERATURA	Temperatura Máxima	La Cosecha 2004		X			IDEAM
		Temperatura Mínima	La Cosecha 2004		X			IDEAM
	ETO	Humedad Relativa	La Cosecha 2004		X			Estimada con Temperaturas a través de la curva de déficit de presión de vapor
		Insolación	La Cosecha 2004		X			Estimada con la ecuación de Armstrong
		Velocidad del Viento	La Cosecha 2005		X			Supuesta en 2 m/s según indicaciones de FAO Paper 56
		Evapotranspiración de referencia	La Cosecha 2004		X			Estimada con Método de FAO-Penman-Monteith
CONCENTRACIONES DE CO ₂	Concentraciones de CO ₂	Mauna Loa-Hawai					Escenarios IPCC SRES	
CULTIVO	DESARROLLO	Fecha de siembra	02 de Junio 2004					Santos & Segura (2005)
		Tipo de Siembra	Directa	Directa			X	Santos & Segura (2005)
		Densidad de Siembra (Plantas /ha)	25000	25000			X	Santos & Segura (2005)
		Tamaño de follaje a la siembra (cm ² /planta)	10	10		X		Estimado por el modelo
		Cobertura de dosel inicial	0,25	0,25			X	Santos & Segura (2005)-relacionada con la densidad de siembra
		Días a emergencia	15	15			X	Santos & Segura (2005) y Discusión en IV Taller Regional (Corpoica 26 de Julio 2012)
		Dosel máximo (%)	80	95			X	Santos & Segura (2005) y Discusión en IV Taller Regional (Corpoica 26 de Julio 2012)
		Días a dosel máximo	96	96			X	Santos & Segura (2005) y Discusión en IV Taller Regional (Corpoica 26 de Julio 2012)
		Coefficiente de crecimiento de dosel	10,2	10,5			X	Santos & Segura (2005) y posterior ajuste en etapa de adaptación
		Coefficiente de decaimiento del dosel	7,9	12,6			X	Santos & Segura (2005) y posterior ajuste en etapa de adaptación
		Días a senescencia	124	139			X	Santos & Segura (2005)
		Duración ciclo	152	159			X	Santos & Segura (2005)
		Días tuberización	51	55			X	Santos & Segura (2005)
		Duración de tuberización	101	104		X		Santos & Segura (2005)
Profundidad mínima de raíces (mts)	0,2	0,2			X	Fernandez (2009) y discusion en IV Taller Regional		

Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad		Variable	Parámetro		Fuente
			Diacol Capiro	Pastusa Suprema		Conser-vativo	No Conser-vativo	
CULTIVO	DESARROLLO	Profundidad máxima de raíces (mts)	0,5	0,5			X	Fernandez (2009) y discusión en IV Taller Regional
		Días a máxima profundidad de raíces	59	59			X	Discusión en IV Taller Regional (Corpoica 26 de Julio 2012)
		Tbase min (oC)	2	2		X		Ivan Valbuena, Investigador de Corpoica (2012), comunicación personal
		Tbase max (oC)	29	29		X		Discusión en IV Taller Regional (Corpoica 26 de Julio 2012)
		Grados día acumulados (GDD)	1650	1743		X		Estimado por el modelo
	ET	Efcteto de follaje muerto en la ultima etapa (%)	60	60		X		Por defecto en el modelo
		Coeficiente de transpiración (Kc)	1,05	1,05		X		Por defecto en el modelo
	PRODUCCIÓN	Índice de cosecha- HI-(%)	85	72			X	Santos & Segura (2005)
		Productividad hídrica (g/m2)	18	18		X		Fereres (2012), comunicación personal
	ESTRÉS HDIRICO	Expansión del follaje	moderadamente sensible	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
		Cierre estomático	moderadamente sensible	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
		Inicio rápido de senescencia	moderadamente tolerante	moderadamente tolerante		X		Por defecto en el modelo
		Estrés por aireación	moderadamente tolerante	moderadamente tolerante			X	Por defecto en el modelo
	ESTRÉS TEMPERATURA	Rango de GD para afectación por bajas temperaturas (°C) desde 0 °C a	11	11		X		Por defecto en el modelo
	ESTRÉS SALINIDAD	Tipo de salinidad	moderadamente sensible	moderadamente sensible		X		Por defecto en el modelo
	SUELOS	CARACTERÍSTICAS DE HORIZONTES	Horizonte	1	2	X		
Descripción			Franco	-	X			Santos & Segura (2005)
Espesor			1,00	-	X			Santos & Segura (2005)
Punto de Marchitez Permanente			14	-	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Capacidad de Campo			29	-	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Punto de Saturación			49	-	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
Conductividad Hidráulica Saturada			175,2	-	X			Estimado con ecuaciones de pedotransferencia
SUPERFICIE		Curva Numero	75	-	X			Por defecto
		Agua rápidamente evaporable (REW)	9	-	X			Por defecto





Módulo	Sub módulo	Inputs	Variedad		Variable	Parámetro		Fuente
			Diacol Capiro	Pastusa Suprema		Conser-vativo	No Conser-vativo	
SUELOS	CAPA RESTRICTIVA	Profundidad de capa restrictiva	No considerada	No considerada	X			No se reporta en el experimento de Santos & Segura (2005)
	AGUA SUBTERRÁNEA	Profundidad de Nivel Freático	Cercano a lo 1.70 metros	Cercano a lo 1.70 metros	X			No se reporta en el experimento de Santos & Segura (2005)
MANEJO	RIEGOS	Requerimientos netos de riego	No se aplico	No se aplico	X			No se reporta efectos de estrés hidrico. Santos & Segura (2005)
	FERTILIDAD	Nivel de fertilidad	No limitante	No limitante				Se reporta aplicación de enmienda y calculo de balance de nutrientes. Santos & Segura (2005)
SIMULACIÓN	PERIODO DE SIMULACIÓN	Fecha inicio de simulación	14 de Abril 2004	14 de Abril 2004	X			Precipitación de 80 mm, buen indicio de condiciones optimas de humedad
		Fecha fin de la simulación	31 de Octubre 2004	7 de Noviembre 2004	X			Fecha de cosecha Santos & Segura (2005)
	CONDICIONES INICIALES	Condiciones iniciales de humedad	Capacidad de Campo	Capacidad de Campo	X			Precipitación de 80 mm, buen indicio de condiciones optimas de humedad