

Materiales para sistemas de drenaje subterráneo



Materiales para sistemas de drenaje subterráneo

ESTUDIO FAO
RIEGO Y
DRENAJE

60

Rev. 1

Por

L.C.P.M. Stuyt

ALTERRA, Wageningen University and Research Centre
Wageningen, Países Bajos

W. Dierickx

Departamento de Ingeniería Rural
Merelbeke, Bélgica

J. Martínez Beltrán

Unidad de Fomento y Aprovechamiento de Aguas
División de Tierras y Aguas de la FAO

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (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.

ISBN 978-92-5-305427-5

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este producto informativo para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor, siempre que se especifique claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción del material contenido en este producto informativo para reventa u otros fines comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor. Las peticiones para obtener tal autorización deberán dirigirse al:

Jefe de la Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica de la División de Comunicación de la FAO

Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia

o por correo electrónico a:

copyright@fao.org

ÍNDICE

Introducción	1
HISTORIA	1
MATERIALES DE DRENAJE ACTUALES	2
PROBLEMAS CON MATERIALES DE DRENAJE	3
ALCANCE DE ESTA PUBLICACIÓN	3
Tuberías de drenaje, accesorios y estructuras auxiliares	5
TUBERÍAS DE DRENAJE	5
Tubos de cerámica	5
Tubos de hormigón	6
Tuberías de drenaje de plástico	6
ACCESORIOS DE TUBERÍAS	8
Tapones terminales	9
Acoples	9
Reductores	10
Conexiones de tuberías	10
ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN	10
Puentes de dren	10
Tubos rígidos	10
ENTRADAS	10
Entradas ciegas	10
Entradas superficiales	13
ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN	13
Cajas de unión	13
Pozos de registro	13
SALIDAS	13
Salidas por gravedad	13
Salidas por bombeo	16
ESTRUCTURAS ESPECIALES	16
Reductores de pendiente	16
Dispositivos de limpieza	16
Estructuras para drenaje controlado y riego subterráneo	19
Materiales envolventes	21
MATERIALES	21
Envolturas minerales granulares	21
Envolturas orgánicas	22
Envolturas sintéticas	23
ESPECIFICACIONES PARA ENVOLTURAS DE DREN	26
Especificaciones para envolturas de grava	27
Especificaciones para envolturas enrolladas previamente	30
DISPONIBILIDAD Y COSTE	35

REVISIÓN DE EXPERIENCIA LOCAL SOBRE MATERIALES DE DRENAJE	36
Zonas áridas y semiáridas	37
Trópicos húmedos	39
Zonas templadas	39
Flujo de entrada de agua en el dren y dentro de la tubería	43
FLUJO HACIA EL DREN	43
RESISTENCIA AL FLUJO DE APROXIMACIÓN Y ENTRADA	45
FLUJO DE ENTRADA DE AGUA EN LA TUBERÍA DE DRENAJE	48
Gradiente de salida	48
Gradiente hidráulico crítico	49
Gradiente de fallo hidráulico	51
RESISTENCIA DE ENTRADA DE TUBERÍAS DE DRENAJE	52
Dren sin envoltura	52
Dren con envoltura	56
Dren con un entorno poco permeable	58
CAPACIDAD DE DESAGÜE DE TUBERÍAS DE DRENAJE	58
El problema de la obstrucción de tuberías y envolturas	61
OBSTRUCCIÓN MINERAL	61
Procesos en suelos en torno a drenes	61
Obstrucción de tuberías	65
OBSTRUCCIÓN QUÍMICA Y BIOQUÍMICA	66
Ocre de hierro	66
Depósitos de yeso y cal	70
Depósitos de manganeso	71
Precipitado sulfuroso	71
Sulfuro de hierro	71
PENETRACIÓN DE RAÍCES EN TUBERÍAS DE DRENAJE	71
Directrices para predecir la necesidad de una envoltura	73
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	74
Textura del suelo	74
Estabilidad estructural	76
Contenido de humedad	78
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	78
Capacidad de intercambio de cationes	79
Salinidad del suelo	79
Sodicidad del suelo	79
CALIDAD DEL AGUA	80
Agua de riego	81
Agua freática	81
CRITERIOS DE PREDICCIÓN	82
Directrices para instalar y mantener materiales de drenaje	83
INSTALACIÓN DE MATERIALES DE DRENAJE SUBTERRÁNEO	83
Procedimientos de instalación	83
Directrices para tuberías de drenaje	85
Directrices para envolturas	87

MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS DE DRENAJE	88
Limpieza con agua a presión	88
Experiencia empírica con agua a presión en el noroeste de Europa	91
Directrices para inyectar agua	92
Investigación sobre materiales de drenaje	95
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y PARÁMETROS DE ENVOLTURA RELEVANTES	95
EVALUACIÓN DE LABORATORIO SOBRE LA APLICABILIDAD DE ENVOLTURA	96
Modelos de tanque de arena	96
Permeámetros de flujo paralelo	98
Directrices para investigación con permeámetro	100
EVALUACIÓN DE CAMPO DE LA APLICABILIDAD DE ENVOLTURA	102
Investigación de campo	102
Directrices para investigación de campo	103
RECOMENDACIONES PARA FUTURA INVESTIGACIÓN	106
Tuberías de drenaje	107
Envolturas de dren	107
Propiedades del suelo	109
Estabilidad de agregados	109
Normas para tuberías y envolturas	111
PARÁMETROS DE ENSAYO PARA TUBERÍAS DE DRENAJE	112
Tubos de cerámica y hormigón	112
Tubos de hormigón	112
Tuberías de plástico	112
PARÁMETROS DE ENSAYO PARA ENVOLTURAS	112
Materiales granulares	112
PLM y geotextiles	112
Geotextiles	113
NORMAS DE AMÉRICA DEL NORTE	113
NORMAS EUROPEAS	114
Referencias	117
ANEXO Borrador de norma europea para tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado	129

Lista de figuras

1. Tapones finales	9
2. Acoples	9
3. Reductor para tubería de drenaje	10
4. Conexiones de tuberías	11
5. Puente de dren	11
6. Uso de tubos rígidos para cruzar un camino, un curso de agua o una fila de árboles	12
7. Entrada ciega	12
8. Entradas superficiales	12
9. Cajas de unión	14
10. Cámaras de inspección (pozos de registro)	14
11. Salidas por gravedad	15
12. Cubeta de bombeo de drenaje	17
13. Reductores de pendiente	17
14. Tubo de acceso para limpieza de laterales de un sistema de drenaje compuesto	18
15. Sistemas de drenaje controlado: (a) codo y tapón con elevador; (b) tapón con derivación; (c) estructura compleja con vertedero de pared	18
16. Envoltura PLM de fibra de coco	22
17. Envoltura PLM hecha de fibras de desecho de polipropileno (PP-300)	24
18. Envoltura PP-450	24
19. Envoltura PP-700	25
20. Envoltura PS-1000	25
21. Envoltura Typar	26
22. Resistencias al flujo de agua hacia un dren que funciona a plena capacidad (a) y sus pérdidas de carga correspondientes (b)	43
23. Flujo de aproximación y pérdida de carga total para evaluar el funcionamiento de un sistema de drenaje en campos experimentales	46
24. El área del flujo de aproximación consta del dren, con o sin envoltura, del relleno alterado de la zanja y del suelo sin alterar	47
25. Flujo horizontal	49
26. Flujo radial	49
27. Gradiente de salida i_{ex} expresado como la relación $i_{ex}K/lqL$ para flujo radial en función del radio del dren r_o	50
28. Flujo radial hacia un dren ideal (a) y hacia un dren real (b)	52
29. Influencia de un flujo parcialmente radial sobre la resistencia de entrada a drenes reales	54
30. Posibles límites entre suelo y aberturas de dren	54
31. Flujo teórico hacia un dren ideal revestido con una envoltura	56

32. Radios efectivos (r_{ef}) para drenes de diferente radio (r_o) con cuatro ranuras longitudinales continuas en función del espesor de la envoltura (d_e) para $\kappa_e=10$	57
33. Filtro natural	62
34. Erosión de contacto	62
35. Torta filtrante	63
36. Disgregación del suelo	63
37. Ejemplo de un subsuelo estratificado (izquierda) y de un subsuelo con macroporos orientados verticalmente formados en antiguos canales de raíces (derecha)	64
38. Imágenes que muestran envolturas de dren y macroporos activos	64
39. Ilustración de la heterogeneidad de los tipos de obstrucción mineral detectados en el interior de envolturas voluminosas	65
40. Clases de textura	75
41. Curvas de distribución del tamaño de partícula	76
42. Rango de la distribución del tamaño de partícula de suelos que pueden causar obstrucción de drenes	77
43. Limpieza con inyección de agua con un equipo de presión media	89
44. Sección transversal de un permeámetro para evaluar interacciones suelo-envoltura	99

Lista de cuadros

1. Relaciones de gradación entre suelo y diámetros de material envolvente granular graduado	29
2. Relaciones del tamaño grava/acuífero máximas permisibles	29
3. Valores ajustados para el espesor de sedimentación (mm) mediante un modelo de regresión, dependiendo del tamaño efectivo de abertura de los poros de la envoltura (O_{90}) y del tipo de envoltura (fina o gruesa), para observaciones hechas en tres campos experimentales en los Países Bajos	33
4. Coste relativo de envolturas PLM en los Países Bajos en 1998, expresado como porcentaje del coste de la envoltura respecto a una tubería de PVC corrugado junto con un producto revestido previamente, sin incluir el coste de instalación. El tamaño O_{90} está especificado en paréntesis	37
5. Materiales de drenaje usados en varios países	38
6. Aplicabilidad de envolturas de dren enrolladas previamente más populares en los Países Bajos	40
7. Resistencias de entrada y relaciones r_{ef} / r_o de tuberías de drenaje sin envoltura	55
8. Riesgo de formación de ocre según el método de Ford y el de tiras de papel indicador	68
9. Problemas con la tasa de infiltración de agua en el suelo relacionada con la RAS_{iw} y la CE_{iw} del agua de riego	81
10. Relación entre presión en bomba, presión en boquilla y caudal, para una manguera flexible de 20 mm de diámetro interno y 300 m de longitud	90
11. Clasificación de acuerdo a la «fracción de la pérdida de carga del flujo de aproximación»	105
12. Clasificación de acuerdo con la «resistencia al flujo de aproximación» o la «pérdida de carga del flujo de aproximación»	105
13. Normas-ASTM para tubos de drenaje de cerámica y hormigón	113
14. Normas de Estados Unidos de América y Canadá para tuberías de plástico corrugado	113
15. Norma europea (EN) para geotextiles y productos relacionados con ellos que pueden ser útiles cuando se usan como envolturas en drenaje agrícola	115

Prólogo

Se necesitan sistemas de drenaje subterráneo fiables que controlen capas freáticas y salinidad, con objeto de mantener o mejorar la productividad de las tierras regables y contribuir al desarrollo rural de zonas bajas de los trópicos húmedos. Además, estos sistemas continúan siendo importantes como medio de control de capas freáticas en algunas áreas de las zonas templadas. La selección de materiales apropiados (tuberías y envolturas) y su correcta instalación y mantenimiento son esenciales para un funcionamiento correcto y duradero de sistemas de drenaje subterráneo. Esto fue reconocido en el Estudio FAO de Riego y Drenaje 9, *Materiales de Drenaje*, publicado en 1972. En esa época, la experiencia sobre materiales de drenaje provenía principalmente de proyectos situados en las zonas templadas del noroeste de Europa y de Estados Unidos de América. Desde entonces, también se ha conseguido experiencia valiosa en países tropicales, la cual puede ser útil y como tal debería estar a disposición de las comunidades de profesionales. En las últimas dos décadas se han hecho importantes avances en ingeniería de drenaje, especialmente en lo que se refiere a materiales y a técnicas de instalación. Este adelanto se ha conseguido como resultado de un gran número de proyectos de investigación y de experiencia práctica, incluso en tierras bajo riego. Por tanto, ha sido necesario actualizar el Estudio FAO de Riego y Drenaje 9.

Ingenieros de campo y contratistas encargados de nuevos proyectos de drenaje necesitan directrices prácticas para seleccionar e instalar tuberías de drenaje y envolturas. Sin embargo, la selección de materiales de drenaje depende de varios factores, de los cuales los más importantes son disponibilidad, durabilidad y coste. Se necesita un procedimiento que permita a los ingenieros predecir si es necesaria la instalación de envolturas. Las directrices para esta selección deben considerar además las especificaciones de los materiales requeridas y estas directrices deben estar disponibles para ayudar a los contratistas en su valoración sobre si los materiales disponibles cumplen dichas especificaciones.

El objetivo de este Estudio es proporcionar esta información práctica a ingenieros de drenaje y contratistas. La publicación se basa en el conocimiento actual del flujo de entrada de agua en tuberías de drenaje y envolturas, y en las propiedades y aplicabilidad de estos materiales. También incluye directrices para valorar la necesidad de envolturas y para la selección del material envolvente más adecuado en relación con las condiciones locales. También se han incluido directrices para la instalación y mantenimiento de materiales de drenaje, así como especificaciones y normas para estos materiales que puedan usarse en documentos de licitación para ejecución de obras de drenaje subterráneo. Además, contiene directrices prácticas para realización de investigaciones de laboratorio y campo a fin de evaluar el funcionamiento de materiales de drenaje.

Agradecimientos

Los autores agradecen a W. H. van der Molen, profesor jubilado de la Universidad de Wageningen, Países Bajos, a L. S. Willardson, que trabajó como profesor en la Universidad del Estado de Utah, Logan, Estados Unidos de América, y a J. Cavelaars, experto de drenaje retirado de Arcadis Euroconsult, Arnhem, Países Bajos, por su disponibilidad para revisar el manuscrito de la versión en inglés. Se han apreciado muchísimo sus sugerencias, observaciones y contribuciones para mejorar su esquema, contenido técnico y legibilidad.

Los autores también desean agradecer el apoyo de H. Wolter, Director de la División de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO durante la preparación de este Estudio de Riego y Drenaje en su versión en inglés.

Se reconoce especialmente a P. Thévenet, Director de Wavin, Varennes sur Allier, Francia, y coordinador del Grupo de Trabajo 18 de CEN/TC 155, por su autorización para incluir el borrador de la norma europea sobre tuberías de drenaje de cloruro de polivinilo corrugado, como un anexo de este Estudio.

También se agradece a Horman Wrapping BV, Países Bajos, por su autorización para publicar las figuras 16 a 21.

Finalmente se dan las gracias a la Sra. C. D. Smith-Redfern por formatear el texto, figuras y cuadros de la versión final en lengua inglesa, así como a C. Rosell por la traducción y a J. Martínez Beltrán por la revisión y edición de la versión final en español, y a la Sra. B. El Zein por el formateo de este texto definitivo para su impresión.

Lista de símbolos

Símbolo	Descripción	Dimensión
A	Área de sección transversal (m^2)	L^2
C_u	Coefficiente de uniformidad	-
CE	Conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_e	Conductividad eléctrica de una pasta de suelo saturada con agua hasta el límite líquido ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_s	Conductividad eléctrica de una solución de suelo a capacidad de campo ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_{gw}	Conductividad eléctrica de agua freática ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CE_{iw}	Conductividad eléctrica de agua de riego ($dS\ m^{-1}$)	$T^3I^2M^{-1}L^{-3}$
CIC	Capacidad de intercambio de cationes (meq/100 g)	-
c_o	Cohesión (Pa)	$ML^{-1}T^{-2}$
D_x	Diámetro de partícula del x% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_5	Diámetro de partícula del 5% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{15}	Diámetro de partícula del 15% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{30}	Diámetro de partícula del 30% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{50}	Diámetro de partícula del 50% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
D_{100}	Diámetro de partícula del 100% del tamaño del material envolvente granular (μm)	L
d	Diámetro interno de tubería (cm)	L
d_e	Espesor de envoltura (cm)	L
d_x	Diámetro de partícula del x% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{10}	Diámetro de partícula del 10% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{15}	Diámetro de partícula del 15% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{50}	Diámetro de partícula del 50% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{60}	Diámetro de partícula del 60% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{85}	Diámetro de partícula del 85% del tamaño del material del suelo (μm)	L
d_{90}	Diámetro de partícula del 90% del tamaño del material del suelo (μm)	L
dh	Pequeño incremento de carga hidráulica (m)	L
dl	Pequeño incremento de longitud (m)	L

Símbolo	Descripción	Dimensión
dr	Pequeño incremento de distancia radial (m)	L
FL	Fracción de lavado	-
H	Altura de un modelo de tanque de arena (m)	L
h	Pérdida de carga (m)	L
h_e	Pérdida de carga de entrada (m)	L
h_h	Pérdida de carga horizontal (m)	L
h_r	Pérdida de carga radial (m)	L
h_t	Pérdida de carga total (m)	L
h_v	Pérdida de carga vertical (m)	L
h_{ap}	Pérdida de carga del flujo de aproximación (m)	L
I_p	Índice de plasticidad del suelo	-
i	Gradiente hidráulico del flujo de agua en el suelo	-
i_c	Gradiente hidráulico crítico	-
i_f	Gradiente de fallo hidráulico	-
i_{ex}	Gradiente de salida	-
K	Conductividad hidráulica ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_e	Conductividad hidráulica de una envoltura ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
	Conductividad hidráulica de suelo alterado en una zanja de dren ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_h	Conductividad hidráulica horizontal del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_r	Conductividad hidráulica radial del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_s	Conductividad hidráulica del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_v	Conductividad hidráulica vertical del suelo ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
K_{ap}	Conductividad hidráulica de la zona de flujo de aproximación ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
k_M	Parámetro recíproco del coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{1/2}\ s^{-1}$)	$L^{1/3}T^{-1}$
L	Espaciamiento entre drenes (m)	L
	Longitud de un modelo de tanque de arena (m)	L
n	Coefficiente de rugosidad de Manning ($s\ m^{-1/3}$)	$TL^{-1/3}$
	Factor de concentración del agua de riego en el suelo	-
O_{90}	Diámetro de poro del 90% del tamaño de abertura del material envolvente (μm)	L
p	Relación entre flujo radial total y sectorial	-
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable	-
Q	Caudal ($m^3\ s^{-1}$)	L^3T^{-1}
q	Caudal específico ($m\ d^{-1}$)	LT^{-1}
RAS	Relación de adsorción de sodio ($meq^{1/2}\ l^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
RAS_e	Relación de adsorción de sodio de una pasta de suelo saturada con agua hasta el límite líquido ($meq^{1/2}\ l^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
RAS_s	Relación de adsorción de sodio de una solución de suelo a capacidad de campo ($meq^{1/2}\ l^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$

Símbolo	Descripción	Dimensión
RAS_{gw}	Relación de adsorción de sodio del agua freática ($\text{meq}^{1/2} \text{l}^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
RAS_{iw}	Relación de adsorción de sodio del agua de riego ($\text{meq}^{1/2} \text{l}^{-1/2}$)	$M^{1/2}L^{-3/2}$
r	Radio de un equipotencial circular (m) Distancia desde el centro del dren (m)	L L
r_e	Radio de la interfase suelo-envoltura (m)	L
r_o	Radio de un dren ideal (m) Radio exterior de un dren (m)	L L
r_{ef}	Radio efectivo o equivalente (m)	L
S	Distancia entre corrugaciones de una tubería corrugada (m)	L
SDT	Sólidos disueltos totales (mg l^{-1})	ML^{-3}
s	Gradiente hidráulico del flujo dentro de una tubería	-
W	Resistencia al flujo ($d \text{ m}^{-1}$) Anchura de un modelo de tanque de arena (m)	TL^{-1} L
W_e	Resistencia al flujo de entrada ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_h	Resistencia al flujo horizontal ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_r	Resistencia al flujo radial ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_t	Resistencia al flujo total ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_v	Resistencia al flujo vertical ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_{ap}	Resistencia al flujo de aproximación ($d \text{ m}^{-1}$)	TL^{-1}
W_{DS}	Masa de una muestra de suelo secada en estufa (g)	M
W_{LL}	Masa de una muestra de suelo al límite líquido (g)	M
W_{PL}	Masa de una muestra de suelo al límite plástico (g)	M
*	Subíndice v (vertical), h (horizontal), r (radial), e (entrada) o t (total)	-
α	Factor de resistencia al flujo	-
α_e	Factor de resistencia al flujo de entrada	-
α_h	Factor de resistencia al flujo horizontal	-
α_r	Factor de resistencia al flujo radial	-
α_t	Factor de resistencia al flujo total	-
α_v	Factor de resistencia al flujo vertical	-
α_e^*	Resistencia al flujo en función del área sectorial con flujo radial	-
α_e'	Factor de resistencia de entrada de la propia tubería de drenaje si está revestida por una envoltura	-
α_{ap}	Factor de resistencia al flujo de aproximación	-
$\alpha_{e,e}$	Factor de resistencia de entrada del dren y de la envoltura circundante	-
$\alpha_{(e,e)W}$	Factor de resistencia de entrada del dren y de la envoltura circundante según Widmoser (1968)	-
β	Ángulo de flujo radial sectorial (rad)	-
ϕ	Ángulo de fricción interna o resistencia al corte (rad)	-

κ_e	Relación entre las conductividades hidráulicas de envoltura y suelo circundante	-
σ_e	Tensión efectiva de las partículas de suelo o tensión entre partículas (Pa)	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_f	Resistencia al corte por unidad de superficie (Pa)	$ML^{-1}T^{-2}$
Δh	Incremento de carga hidráulica (m)	L
Δl	Incremento de longitud (m)	L

Capítulo 1

Introducción

HISTORIA

Cuando comenzó el drenaje de tierras agrícolas en la región Mesopotámica hace cerca de 9000 años no había tuberías (Van Schilfgaarde, 1971). Muy probablemente el drenaje subterráneo se realizaba con grava y piedras o con materiales voluminosos permeables, tales como manojos de ramas de árboles y arbustos que se colocaban atados en el fondo de una zanja. Las primeras tuberías de drenaje, que aparecieron hace aproximadamente 4000 años, fueron descubiertas en el valle del Bajo Indo (Ami, 1987). En Europa, los primeros sistemas de drenaje subterráneo se instalaron al inicio de la era Cristiana, pero este tipo de drenaje fue prácticamente olvidado en los siglos siguientes.

Alrededor del año 1544 reaparecieron en Inglaterra sistemas de drenaje, cuando los holandeses comenzaron a exportar hacia ese país el saber de sus ingenieros, que eran reputados expertos en la construcción de sistemas de drenaje y diques. Cornelius Vanderdelf fue el primer holandés que llevó a cabo trabajos de drenaje en Inglaterra al inicio del siglo XVII, seguido posteriormente por otros famosos ingenieros como Cornelius Vermuyden y Joos Croppenburgh (Chapman, 1956). Poco más tarde se utilizaron tejas semicirculares a modo de drenes en Escocia y en la Europa continental. Estas tejas deben considerarse los predecesores de los tubos de drenaje de cerámica, de aquí su nombre. Seguidamente se utilizaron drenes sencillos en forma de herradura, este tipo de drenes sobre placas planas, drenes en forma de D con base plana y finalmente tubos de sección circular. En 1840, la invención en Inglaterra del extrusor de tubos de cerámica favoreció la difusión del drenaje de tierras en Europa. Hace aproximadamente dos siglos, se introdujo el drenaje de tubería en los Estados Unidos de América. Durante el período siguiente, se colocaban a mano tubos de cerámica manufacturados mecánicamente y alrededor de 1960 se generalizó la instalación mecánica. La introducción de tuberías de drenaje de plástico perforado en la década de 1960 incrementó la efectividad, eficiencia y economía de instalación.

Se han hecho tuberías de drenaje con tablas (drenes de caja) y ladrillos; tubo de cerámica en forma de herradura y con sección circular; tubo de hormigón; tubo perforado de fibra bituminosa y tubería perforada de plástico liso y corrugado. Actualmente, se utilizan con frecuencia tuberías corrugadas aunque también tubos de hormigón y de cerámica. La selección del material depende de factores económicos de la zona en cuestión.

Schwab y Fouss (1999) sintetizaron los avances más significativos del drenaje de tierras agrícolas. En orden cronológico, las primeras actuaciones fueron las siguientes:

- Instalación del primer dren de tubería en los Estados Unidos de América (1835).
- Invención del extrusor de tubo en Inglaterra (1840).
- Fabricación del primer tubo de drenaje con arena y cemento en los Estados Unidos de América (1862).
- Uso de máquinas zanjadoras (1880).
- Introducción del tubo liso de PE en los Estados Unidos de América (1948).
- Primera utilización de tubería de PVC lisa y rígida en los Países Bajos (1959).
- Introducción de la primera tubería de PVC flexible en Alemania (1963).
- Instalación de la primera tubería de PE flexible corrugado en Estados Unidos de América (1965).
- Aparición de las máquinas de rejón (1969).

- Primera norma para tubería de PE corrugado, la ASTM F405 (1974).
- Preparación de una norma en los Países Bajos para envoltura enrollada previamente (1981).
- Primer borrador de norma ISO para tuberías de PVC corrugado, (ISO/DIS 8771, 1985).
- Preparación del borrador de norma-EN para tuberías de PVC corrugado (CEN/TC155/WG18, 1994).

Más datos históricos sobre materiales de drenaje pueden encontrarse en Weaver (1964) y Van Someren (FAO, 1972).

MATERIALES DE DRENAJE ACTUALES

En la actualidad se usan materiales de drenaje que comprenden tuberías de drenaje y sus accesorios, envolturas y estructuras auxiliares de drenaje. Ahora están claramente establecidos sin ambigüedades criterios para diseñar tuberías de drenaje, tanto en lo que respecta a tamaño de tubería, disposición y geometría de perforaciones, así como a material de tubería.

Cuando se instala un dren subterráneo en ciertos suelos puede ser necesario tomar ciertas medidas para proteger la tubería de drenaje de la entrada de partículas de suelo. Pueden entrar partículas o agregados de suelo en la tubería a través de las perforaciones de su pared, debido a la fuerza de arrastre del agua. Este proceso nunca puede impedirse completamente pero puede reducirse substancialmente o incluso paralizarse mediante el uso de material externo poroso colocado alrededor de la tubería. El medio poroso diseñado con este fin se denomina «envoltura de dren» aunque erróneamente se ha llamado con frecuencia «filtro de dren». El funcionamiento de un filtro es tal que al retener el material de suelo puede llegar a obturarse o causar la obstrucción del suelo circundante. Al contrario, una buena «envoltura de dren» restringe la entrada de sedimentos, proporciona material de alta conductividad hidráulica y estabilidad estructural en torno al dren, y no se obstruye con el tiempo.

El diseño de envolturas *convencionales* no es un gran problema. Estas envolturas, que pertenecen a la *primera generación de envolturas*, son de grava, conchas trituradas o materiales orgánicos sueltos como residuo de turba. En Estados Unidos de América se han desarrollado progresivamente criterios para diseñar envolturas granulares minerales (Willardson, 1974). Existen criterios bien fundamentados para el diseño de envolturas granulares tradicionales (de grava y arena gruesa) y se han aplicado en la práctica con éxito (Terzaghi y Peck, 1961).

En muchas zonas escasea o no se encuentra material envolvente de grava adecuadamente clasificada y por ello constituye el coste principal de instalar drenes. Además, el manejo y la colocación de grava alrededor de una tubería de drenaje es una operación engorrosa que origina altos costes de instalación. Esto ha llevado a buscar materiales más livianos sustitutivos de envolturas de grava.

Generalmente, los materiales envolventes alternativos constaban de fibras orgánicas como las que se encuentran en residuos de cultivos. En áreas donde la grava era cara se utilizaron con éxito durante muchos años envolturas de turba ya mencionadas. En intentos posteriores para reducir el coste de sistemas de drenaje y simplificar su instalación mecánica, la *segunda generación de envolturas*, que incluye materiales envolventes en forma de tiras, reemplazó gradualmente a los materiales orgánicos sueltos. Un rollo de estos materiales puede transportarse en una zanjadora y colocarse sobre una tubería mientras se instala. Los primeros materiales elaborados en forma de tiras fueron de turba fibrosa, paja de lino y fibras de coco. Al mismo tiempo, una envoltura tan tradicional como la turba de alta calidad comenzó a escasear, impulsando la búsqueda de alternativas. En la década de 1960, se utilizaron tiras de láminas de fibra de vidrio que eran económicamente accesibles y fáciles de manejar.

Tras la introducción de tuberías corrugadas en 1962 se abandonó el uso de materiales envolventes en forma de tiras. En Europa aparecieron envolturas orgánicas fibrosas que podían revestir tuberías corrugadas antes de su instalación. Podía entonces instalarse conjuntamente tubería y envoltura en forma de dren revestido. Esto redujo los costes de instalación en aproximadamente un 50 por ciento.

Aunque el uso de envolturas orgánicas se difundió ampliamente su propensión a la descomposición microbiana fue un inconveniente. Por ello, la última y *tercera generación de envolturas*, las sintéticas, ha ganado popularidad bastante rápidamente. Su uso es común en América del Norte y Europa y está aumentando rápidamente en países como Egipto, Pakistán y la India. Las envolturas sintéticas son tiras de geotextiles que revisten una tubería de drenaje o coberturas de fibras sintéticas sueltas. La mayor parte de las envolturas de fibra sintética se fabrican a partir de material reciclado, como son las fibras residuales de polipropileno procedentes de fabricar alfombras.

PROBLEMAS CON MATERIALES DE DRENAJE

La instalación de drenes de forma tradicional, o sea manualmente, no puede hacerse bajo condiciones adversas, como son las ocasionadas por capas freáticas someras o por un estado de humedad generalizada. Con frecuencia, esta restricción ha evitado el mal funcionamiento de sistemas de drenaje instalados manualmente y ha asegurado su larga duración. La velocidad de instalación ha aumentado drásticamente con la mecanización de las obras, pero el control de su calidad (p. ej. la precisión de la pendiente) resulta más difícil, especialmente tras la aparición de la tubería corrugada flexible. También es posible instalar drenes en condiciones adversas pero es difícil de supervisar, porque tanto contratistas como empresas constructoras tratan de tener sus máquinas operativas el mayor tiempo posible, debido a que los costes fijos de la maquinaria de instalación son altos. A partir de 1965, el uso de láser para controlar la pendiente mejoró la precisión de instalación.

La mecanización de instalar drenes, así como la utilización de nuevos tipos de envolturas de dren, ha llevado por un lado a reducir costes, pero por otro han surgido una serie de problemas hasta entonces desconocidos. Algunos de estos problemas se han presentado al instalar drenes en suelos muy húmedos o al utilizar nuevos tipos de envolturas que no pueden usarse en todo tipo de suelos.

El uso de una envoltura de dren depende fundamentalmente de las propiedades físicas de los suelos. Sin embargo en la práctica, el proceso de selección depende de la disponibilidad y coste. Especialmente en zonas áridas, donde se instalan sistemas de drenaje para controlar el anegamiento y salinización de los suelos, es necesario prioritariamente encontrar alternativas asequibles a envolturas de grava, que potencialmente son excelentes pero caras. La considerable investigación llevada a cabo y la experiencia práctica acumulada, desde la década de 1960 hasta fines de la década de 1980, han proporcionado directrices para diseñar envolturas y seleccionar materiales para distintos tipos de suelos.

ALCANCE DE ESTA PUBLICACIÓN

El objetivo de este nuevo Estudio FAO de Riego y Drenaje sobre *materiales para sistemas de drenaje subterráneo* es describir y evaluar el conocimiento existente sobre materiales de drenaje, especialmente en lo relativo a tuberías de drenaje y envolturas. Esta publicación incluye directrices para su selección, diseño e instalación, prescripciones técnicas para documentos de contratación de obras de drenaje subterráneo y también consideraciones sobre mantenimiento de drenes. Se ha hecho cierto esfuerzo para investigar en profundidad los criterios existentes y analizar sus semejanzas y contradicciones. Esta investigación ha dado por resultado un conjunto de criterios de aplicación práctica para materiales envolventes.

El conocimiento actual sobre materiales de drenaje y su conveniencia puede ser de interés de ingenieros y contratistas para su aplicación. Esta publicación no es un «manual de materiales de drenaje» para expertos en drenaje, sino una *guía de aplicación* preparada en principio en beneficio de ingenieros proyectistas y contratistas.

En esta publicación se han tratado los temas siguientes:

- Descripción de las tuberías de drenaje subterráneo existentes y de algunas estructuras auxiliares (Capítulo 2).
- Evaluación de las propiedades de envolturas de dren y de su conveniencia para aplicaciones específicas, como resultado de observaciones en áreas piloto y de simulaciones analógicas en laboratorios (Capítulo 3).
- Análisis del conocimiento existente sobre el flujo de entrada de agua en envolturas y drenes (Capítulo 4).
- Directrices para evaluar la necesidad de envolturas y para seleccionar el material envolvente más apropiado en función de las condiciones locales (Capítulos 5 y 6).
- Directrices para instalar y mantener materiales de drenaje (Capítulo 7).
- Necesidades de investigación sobre materiales de drenaje (Capítulo 8).
- Revisión y evaluación de normas y especificaciones existentes sobre tuberías de drenaje y envolturas utilizadas actualmente (Capítulo 9 y Anexo).

Capítulo 2

Tuberías de drenaje, accesorios y estructuras auxiliares

TUBERÍAS DE DRENAJE

Durante muchos años se han utilizado predominantemente tubos de cerámica y hormigón hasta que alrededor de 1960 aparecieron los tubos de drenaje de plástico liso. Desde poco tiempo después, las tuberías de plástico corrugado son las más utilizadas.

Los tubos de cerámica, hormigón o plástico dan resultados satisfactorios si reúnen las normas de calidad establecidas y se instalan correctamente. Las tuberías para colectores son de hormigón o plástico, aunque este último material no es competitivo para diámetros superiores a 200 mm. Sin embargo, pueden instalarse con cierta facilidad colectores de plástico corrugado perforado, revestidos de una envoltura laminar, si el suelo circundante consiste de arena movediza o tiene otras propiedades que le dan inestabilidad. Una vez instalado el colector puede actuar como dren suprimiendo la inestabilidad del suelo y posibilitando conectar drenes laterales, instalar pozos de registro o ambas cosas.

En teoría, existen criterios válidos para seleccionar distintos tipos específicos de tubería de drenaje, pero en la práctica, la selección se basa fundamentalmente en la disponibilidad local y en la comparación de costes. Además, puede ser de interés considerar las siguientes observaciones (Schultz, 1990):

- Si se dispone de todo tipo de tubería el uso de la de plástico corrugado tiene ventajas indudables (Apartado *Tuberías de drenaje de plástico*).
- Si no se dispone de tuberías, lo más práctico y más fácil de llevar a cabo es fabricar localmente tubos de hormigón, ya que su fabricación es económica a pequeña escala y necesita menos pericia que la requerida para otro tipo de tubo. Las tuberías de plástico ocupan una posición intermedia, pues en cantidades relativamente grandes es posible fabricarlas localmente a partir de materia prima importada.
- Para la instalación mecánica son más adecuadas las tuberías de plástico y tienen la ventaja de que una instalación incorrecta afecta menos su funcionamiento.
- Generalmente, el coste de fabricación de tubos de menor diámetro (es decir <100 mm) es similar para tubos de cerámica, hormigón o plástico. Sin embargo, para tuberías de mayor diámetro por lo general lo más barato es el hormigón y lo más caro el plástico.

Tubos de cerámica

El tubo de cerámica puede ser poroso o vidriado. Los tubos se adosan en la zanja del dren y el agua entra a través de las uniones entre dos tubos contiguos. El de tipo poroso generalmente tiene este tipo de uniones pero también puede unirse mediante una pieza con forma de aro (llamado «collar» o «unión de campana»). Este tipo de tubo es más caro y su costo adicional solamente se justifica en suelos muy blandos. Los tubos de buena calidad están bien cocidos y no tienen grietas ni burbujas. No debe utilizarse tubo de cerámica con grietas o con otros defectos visibles ni con malformaciones.

Los tamaños de tubería de drenaje estándar son 50, 65, 75, 80, 100, 130, 160 y 200 mm de diámetro interno. En el Reino Unido la medida nominal mínima de diámetro interno es 75 mm, que tiene capacidad de transporte de agua más que suficiente, por lo que si se usan tubos de cerámica para drenes laterales el diámetro raramente es un factor

de diseño relevante. El espesor de pared varía entre 12 y 24 mm y puede expresarse como $0,08d+8$ mm, siendo d el diámetro interno del tubo expresado en mm. Los tubos de cerámica corrientes tienen una longitud de 300 o 333 mm, aunque en algunos países existen tubos de mayor longitud. En Alemania, los tubos de cerámica se fabricaban con surcos longitudinales en su parte externa para, en combinación con materiales envolventes, facilitar el flujo de agua a lo largo del dren.

El tubo de cerámica es muy duradero y muy resistente a alterarse y deteriorarse en suelos agresivos, p. ej. en suelos ricos en sulfatos y en compuestos químicos corrosivos, por lo que pueden utilizarse en casi toda circunstancia. El tubo de cerámica es más liviano que el de hormigón y tiene una excelente resistencia, pero es frágil (especialmente el tipo alemán con surcos) por lo que debe manejarse con cuidado. Los tubos de cerámica requieren un manejo manual considerable, aunque los fabricantes lo han mejorado mediante varios métodos de transporte y manejo.

La fabricación de tubos de cerámica requiere mucha pericia y una planta bien equipada. Las características principales de calidad son uniones rectas, ausencia de grietas y homogeneidad de la materia prima (arcilla bien mezclada). La tasa de absorción máxima de agua de los tubos después de haber estado sumergidos durante 24 horas debe ser menor del 15 por ciento del peso del tubo. El peso de 1000 tubos debe exceder ciertos valores mínimos, p. ej. 1400 kg para tubo de 60 mm de diámetro y 2000 kg para tubo de 80 mm de diámetro.

En ciertas zonas todavía se colocan tubos de cerámica y de hormigón manualmente en una zanja excavada a mano o mecánicamente. Estos tubos pueden cubrirse con materiales voluminosos o con «envolturas» en forma de tira.

Los tubos de cerámica deben instalarse de manera que queden perfectamente alineados. La separación máxima entre dos tubos contiguos no debe superar 3 mm, excepto en caso de suelo arenoso donde no debe superar $2d_{85}$, siendo este valor el tamaño de partícula para el que el 85 por ciento de las partículas de suelo, referido a su peso en seco, tienen un diámetro menor.

Tubos de hormigón

Se ha usado tubo de hormigón a gran escala, p. ej. en Egipto, Irak y otros países. Se utiliza si no se dispone de tubo de cerámica o si se necesitan grandes diámetros. Los tubos de hormigón se usan por lo general para tamaños medios o grandes, con tubos de 0,60, 0,91, 1,22 y 2,40 m de largo y diámetros internos de 100, 150 y 200 mm o incluso mayores. Generalmente se refuerzan tubos de más de 300 mm de diámetro interno. Normalmente se colocan adosados por sus extremos.

La fabricación de tubos de hormigón es más sencilla que la de tubos de cerámica. Los tubos deben estar bien hechos y acabados, sin grietas ni desconchones y debidamente curados.

Deben usarse solamente tubos de hormigón cuando los análisis de suelo y agua freática muestren que las condiciones son favorables para su uso. Se pueden deteriorar tubos hechos con cemento común en suelos ácidos o ricos en sulfatos o cuando el agua contiene sales alcalinas u otros compuestos químicos. No deben usarse tubos de hormigón si los colectores llevan residuos industriales o domésticos. Para resistir la agresión química (p. ej. ácidos o sulfatos) deben usarse cementos especiales altamente resistentes a sulfatos y hormigón de alta densidad.

Los tubos de hormigón se pueden desintegrar lentamente a causa de su alteración y son erosionables por un flujo rápido de agua que transporte materiales abrasivos. Sin embargo, en muchos casos, su instalación permanente es duradera y se justifica.

Tuberías de drenaje de plástico

La principal ventaja de las tuberías de plástico respecto a los tubos de cerámica y hormigón es su menor peso por unidad de longitud, con la consiguiente reducción

considerable del coste de transporte. Otro factor de ahorro adicional es la menor necesidad de mano de obra en su instalación.

Inicialmente, las tuberías de plástico liso se hacían de cloruro de polivinilo rígido (PVC) con ranuras longitudinales para la entrada de agua. Sin embargo, este tipo de tubos nunca tuvo una amplia utilización, ya que fueron sustituidos rápidamente por tuberías de plástico corrugado disponibles desde 1963. Estas tuberías dieron tan buenos resultados que gradualmente reemplazaron a los tubos de cerámica y hormigón. Este proceso de sustitución aún continúa en muchos países. La forma corrugada de las paredes no solamente da flexibilidad a la tubería sino que además, para la misma cantidad de materia prima utilizada, la hace más resistente a la compresión que la tubería lisa.

La aparición de tubería corrugada marcó un hito en la historia del drenaje de tierras agrícolas. Esta tubería flexible es muy adecuada para instalación mecánica y por tanto los costes de instalación se reducen considerablemente. Además, la tubería corrugada ha facilitado el desarrollo de técnicas de instalación sin apertura de zanja.

La sustitución de los tubos de cerámica y hormigón por tuberías de plástico corrugado era esperable ya que este tipo de tubería tiene grandes ventajas, a saber:

- Su peso más liviano facilita el manejo aún en caso de tramos muy largos.
- La gran continuidad de la tubería facilita su manejo, causa menos problemas de alineación y reduce demoras en el suministro de tubería, incrementándose así la velocidad de instalación de las máquinas de drenaje.
- La flexibilidad y posibilidad de enrollado facilita el manejo, transporte e instalación.
- El acceso de agua se facilita porque el área perforada es mayor y está distribuida más uniformemente.
- Su revestimiento con materiales envolventes es más fácil.
- La ejecución de obras es más adecuada al no haber uniones demasiado anchas ni defectos de alineación.
- La necesidad de mano de obra es menor y, por ende, el coste de mano de obra en la fabricación, manejo, transporte e instalación es también menor.
- Es inerte a todos los compuestos químicos del suelo más frecuentes.

Las tuberías corrugadas también presentan desventajas respecto a los tubos de cerámica y hormigón:

- Se deterioran por radiaciones ultravioletas si se exponen a la luz solar durante largos períodos, especialmente las tuberías de PVC.
- Son más quebradizas a bajas temperaturas.
- Tienen mayor riesgo de deflexión a altas temperaturas y de excesivo alargamiento durante la instalación.
- Presentan menor resistencia a deflexión bajo carga permanente.
- Tienen riesgo de aplastamiento por efecto de una carga repentina, p. ej. por derrumbe de la pared de la zanja o por piedras.
- Para igualdad de diámetro interno tienen menor capacidad de transporte debido a la rugosidad de las corrugaciones.
- No son resistentes al fuego.
- No se pueden recolocar fácilmente en el campo sin dañarlas con la barra que se usa con tubos de cerámica y hormigón.

Los drenes de plástico corrugado son de PVC, polietileno de alta densidad (PE) o polipropileno (PP). La preferencia por alguno de esos materiales se basa en factores económicos. En Europa, los drenes corrugados son principalmente de PVC, excepto en el Reino Unido donde son de PE y en menor grado de PP. En Estados Unidos de América y en Canadá la mayor parte de las tuberías de drenaje son de PE, principalmente por el menor precio de la materia prima. Ambas tuberías, de PVC o PE, pueden ser de buena calidad aunque estas materias primas tienen diferentes propiedades físicas:

- La menor rigidez del PE hace que las tuberías se puedan deformar fácilmente bajo carga, sobre todo a temperaturas de alrededor de 40°C y si están sometidas a tensión longitudinal.
- Las tuberías de PVC son más susceptibles a la radiación ultravioleta y se vuelven quebradizas por su exposición al sol; por ello, debe evitarse almacenar tuberías al aire libre sin protección.
- A bajas temperaturas las tuberías de PVC son más quebradizas que las de PE; por ello, las de PVC no deben instalarse a temperaturas externas por debajo de 3°C ya que el riesgo de agrietarse es demasiado alto.
- El PVC se ablanda a 80°C y las tuberías de drenaje se deforman si se exponen a tal temperatura. Especialmente en zonas áridas y semiáridas debe tenerse especial cuidado en evitar tales condiciones de almacenamiento.
- El PVC tiene algunos inconvenientes ambientales ya que cuando se quema forma ácido clorhídrico.

En el noroeste de Europa se utilizan tuberías de PP con fines agrícolas pero su uso no está muy extendido, aunque son adecuadas en invernaderos ya que resisten el calor y toleran la desinfección de suelos con vapor.

Por lo general, las medidas *europas* de tubería se refieren al diámetro externo, siendo 40, 50, 65, 80, 100, 125, 160 y 200 mm los diámetros estándar, aunque también existen diámetros mayores. Las medidas *norteamericanas* de tubería se refieren al diámetro interno y son de 102, 127, 152, 203, 254, 305, 381, 457 y 610 mm. El diámetro interno es por lo general 0,9 veces el externo. Las tuberías de plástico corrugado de diámetros inferiores a 250 mm se distribuyen en rollos y las de diámetros superiores en piezas de 6 m de largo.

El agua entra en las tuberías corrugadas a través de perforaciones hechas en el valle de las corrugaciones. Son frecuentes aberturas longitudinales o «ranuras» pero también orificios circulares. Las perforaciones pueden tener un diámetro o una anchura de ranura que varía de 0,6 a 2 mm. La longitud de las ranuras es aproximadamente 5 mm pero en tuberías de mayor diámetro puede ser mayor. Las perforaciones deben distribuirse uniformemente en la pared de la tubería, por lo general al menos a lo largo de cuatro filas con un mínimo en cada fila de dos perforaciones cada 100 mm. En Europa, el área de perforación debe ser al menos 1200 mm² por metro de tubería.

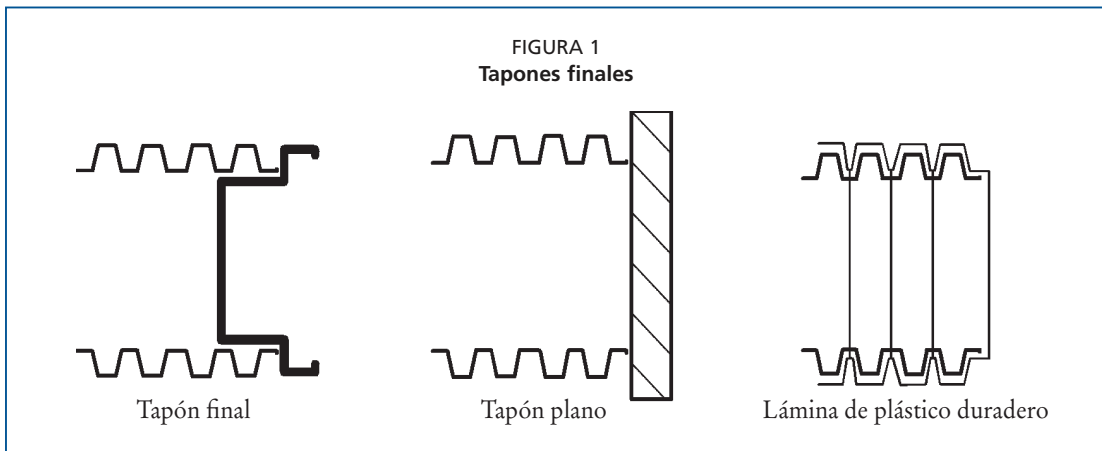
La instalación mecánica de tuberías de plástico corrugado es muy sencilla. Generalmente, las tuberías de menor diámetro se portan embobinadas en la máquina y se desenrollan a medida que prosigue la instalación. Las tuberías de mayor diámetro generalmente se disponen sobre el campo y se van colocando con la máquina. En cualquier caso, para prevenir daños y estiramiento longitudinal de los tubos, siempre es necesario supervisar con detenimiento las tuberías y controlar su correcta instalación. Es muy importante controlar regularmente la calidad de tuberías de plástico corrugado. Parte de un programa de ensayo debe ser el estudio del efecto del impacto de cargas repentinas, simulando el derrumbe de la pared de la zanja sobre la tubería a temperaturas similares a la ambiental durante la instalación.

ACCESORIOS DE TUBERÍAS

Los sistemas de drenaje subterráneo requieren accesorios y estructuras especiales como son: conexiones entre tuberías (acoples, reductores, uniones, tapones terminales), salidas por gravedad o mediante bombeo, cajas de unión, cámaras de inspección (pozos de registro), puentes de dren, tubos rígidos sin perforar, entradas ciegas, entradas superficiales, dispositivos para drenaje controlado o para riego subterráneo y también para limpieza. Los fabricantes de tubería hacen algunas conexiones, otras son fabricadas por compañías especializadas y otros accesorios se construyen in situ.

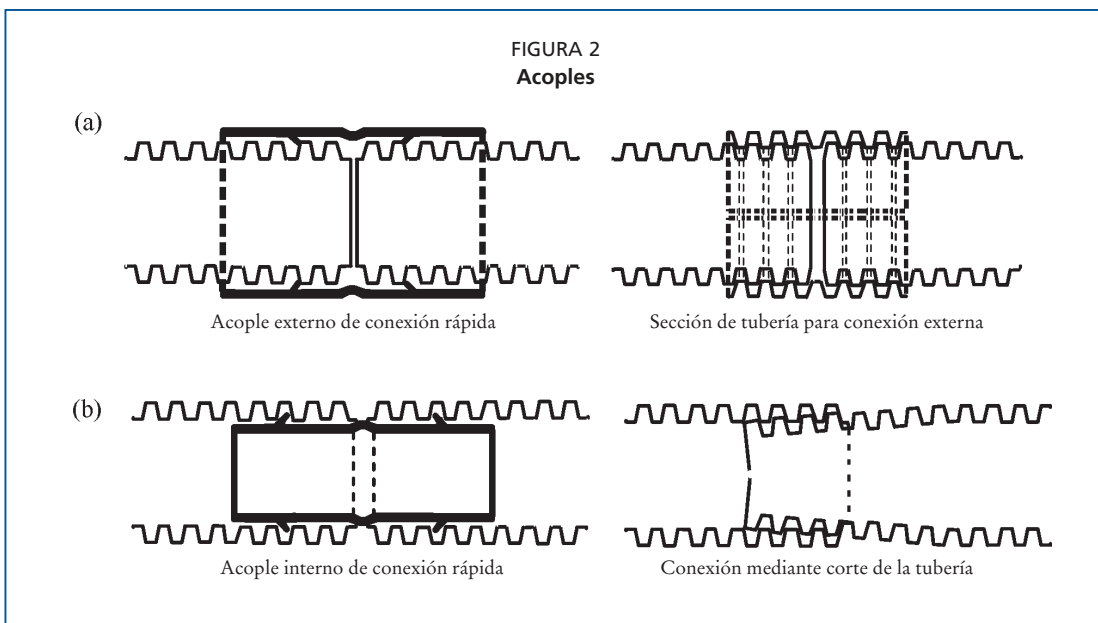
Tapones terminales

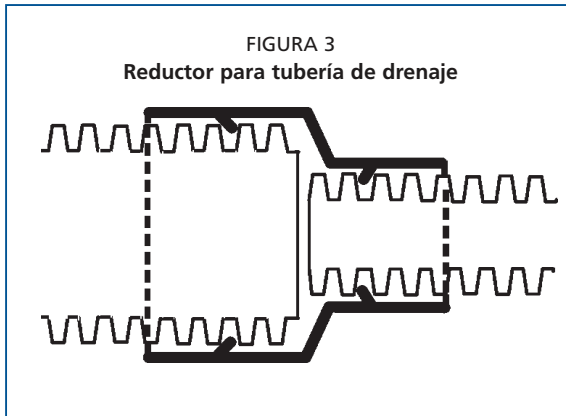
Los tapones terminales impiden la entrada de partículas de suelo en el extremo final del dren aguas arriba. Pueden hacerse del mismo material de la tubería pero puede usarse también con esta finalidad cualquier material plano duradero (Figura 1).



Acoples

Generalmente las tuberías corrugadas tienen acoples externos de «conexión rápida» para unir tuberías del mismo diámetro. Alternativamente, puede usarse un trozo de tubo del mismo diámetro que se corta para facilitar su colocación alrededor de ambos extremos de tubería y se fija firmemente con cinta o alambre para mantenerlo en su lugar durante la instalación (Figura 2a). Pueden usarse acoples internos (Figura 2b) si se coloca tubería sin apertura de zanja, para impedir la separación de las tuberías conectadas mientras pasan por el mecanismo de alimentación de tubería (Schwab y Fous, 1999). También pueden conectarse tuberías internamente cortando el extremo de la tubería de aguas arriba y formando un cono que se enchufa en el extremo de la tubería de aguas abajo. Estas conexiones no son muy fiables y dificultan el flujo de agua y de sólidos en suspensión.





Reductores

Los reductores conectan los extremos de dos tuberías de diferente diámetro (Figura 3).

Conexiones de tuberías

Para todo tipo de tuberías se dispone comercialmente de una gran variedad de conexiones hechas de diferentes materias primas. Generalmente, las conexiones para tubos de cerámica, hormigón y plástico corrugado son manufacturadas por los propios fabricantes de tubería y por tanto raramente son intercambiables.

Las piezas en cruz, en forma de *T* y de *Y* conectan laterales con colectores o colectores entre sí (Figura 4a). Muchas conexiones se fabrican con extremos de varias medidas (Figura 4b) facilitándose así la unión de colectores y laterales de distinto tamaño (Schwab y Fouss, 1999). Los extremos de las conexiones se cortan o se adaptan en el campo eliminando alguno de sus componentes para ajustarlas al diámetro requerido. Actualmente, para conectar laterales con colectores se utilizan conexiones sencillas con codos o piezas en *T* colocados en la parte superior del colector (Figura 4c).

ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN

Puentes de dren

Normalmente las tuberías se colocan en suelo natural sin alterar, que tiene suficiente resistencia para soportarlas. Sin embargo, cuando un dren pasa por un lugar blando donde el suelo todavía no se ha asentado, p. ej. una antigua zanja rellenada, debe utilizarse un puente para mantener el nivel del tubo durante el asentamiento del suelo. Estos puentes pueden hacerse con piezas de madera sobre las que se coloca el dren o mediante un tubo rígido (véase el Apartado *Tubos rígidos*) protegiendo el dren (Figura 5).

Tubos rígidos

Las tuberías de drenaje pueden conectarse o introducirse en un tubo rígido, de hormigón reforzado, de plástico o revestido de acero, cuando se necesita cruzar: un camino, un curso de agua, una cuneta, un suelo inestable (véase el Apartado *Puentes de dren*), una fila de árboles para impedir la entrada de raíces en las tuberías, u otros obstáculos (Figura 6).

ENTRADAS

Entradas ciegas

Las entradas ciegas tienen por objeto drenar aguas estancadas a la vez que interceptan sedimentos. Consisten en una zanja situada sobre el dren que se rellena con material poroso (Figura 7). Como material de relleno son preferibles materiales duraderos como piedras, grava o arena gruesa. Su graduación puede variar desde el material más fino en la superficie hasta la fracción más gruesa en el fondo, aunque también la zanja puede rellenarse con un único material poroso apropiado. La ventaja de las entradas ciegas es su bajo coste inicial y la no interferencia con operaciones de labranza. Sin embargo, este tipo de entradas ha sido generalmente insatisfactorio porque tienden a obstruirse en la superficie con partículas finas de suelo y otros sedimentos.

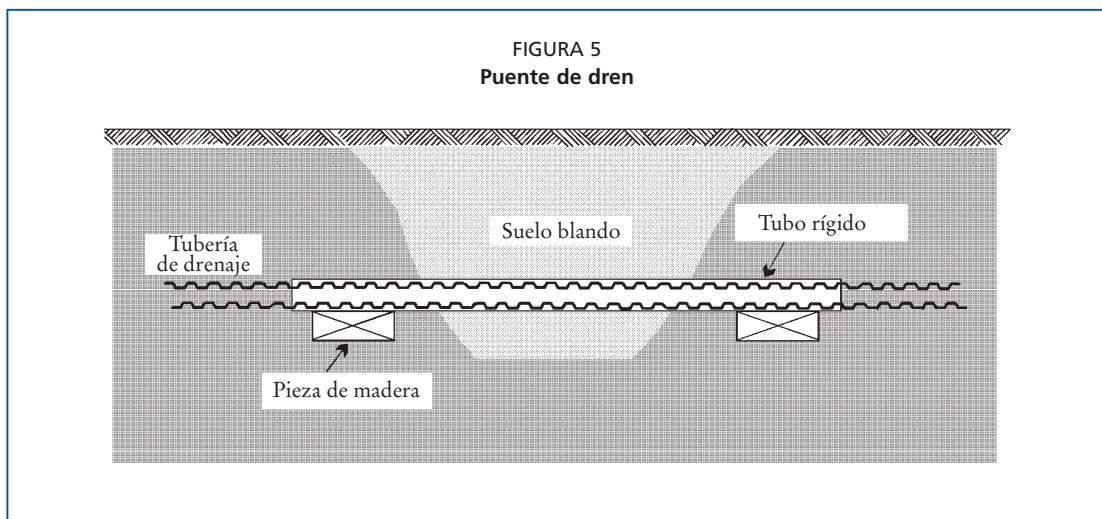
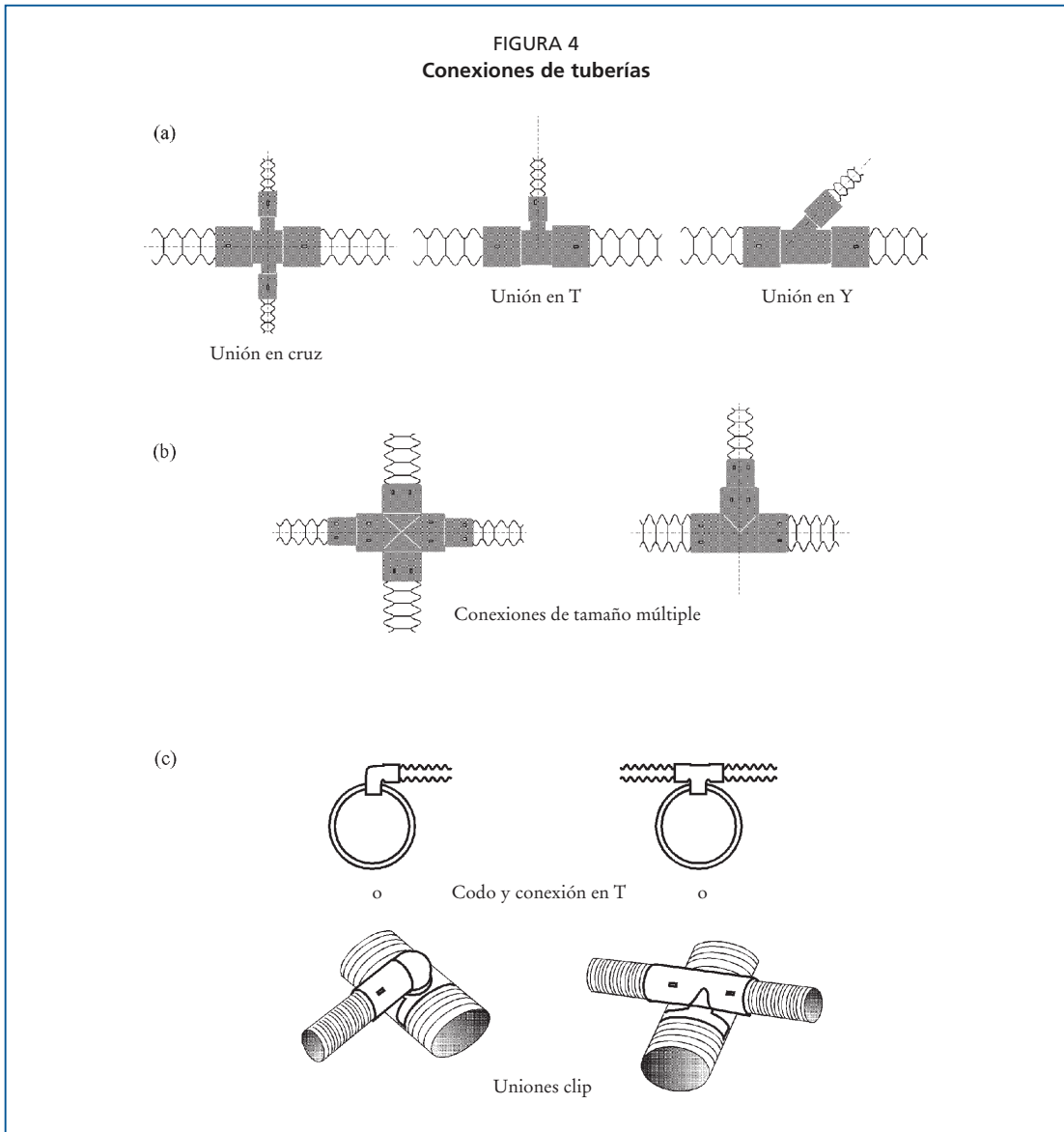


FIGURA 6
Uso de tubos rígidos para cruzar un camino, un curso de agua o una fila de árboles

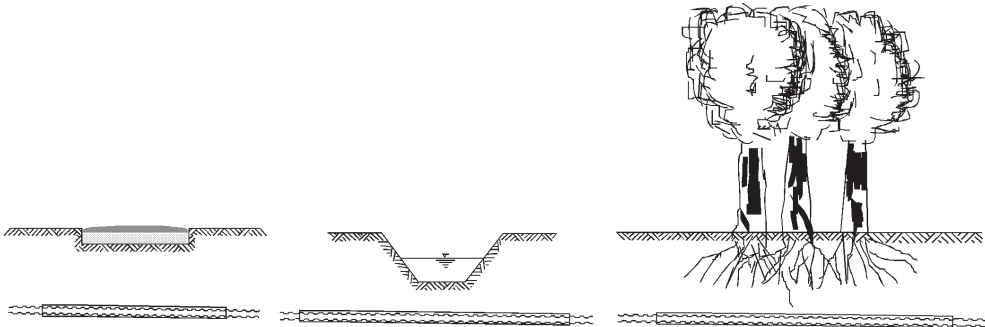


FIGURA 7
Entrada ciega

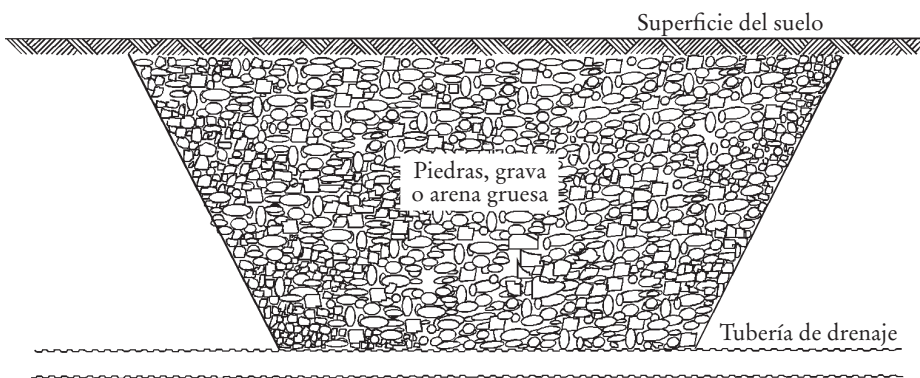
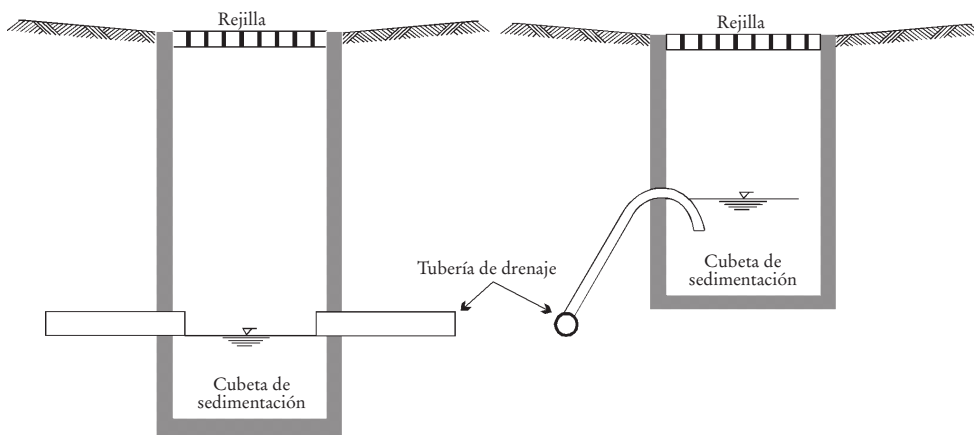


FIGURA 8
Entradas superficiales



Entradas superficiales

Las entradas de agua superficial se utilizan algunas veces para evacuar agua superficial de ciertas áreas localizadas a través de un sistema de drenaje, si no es posible o impracticable la construcción de zanjas. Es esencial tener una cubeta de sedimentación para impedir o reducir el colmatado de los drenes. Este tipo de entrada puede ubicarse en la línea del colector aunque es preferible situarla junto al mismo y conectarla con el colector mediante un sifón (Figura 8) como medida preventiva de un mantenimiento insuficiente. Generalmente, las entradas superficiales se hacen de mampostería o de hormigón in situ, pero también se pueden usar tubos de plástico rígido o de hormigón. Usualmente, se instala una rejilla para evitar la entrada de residuos y basura.

ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN

Cajas de unión

Las cajas de unión se utilizan en el lugar en que se unen dos o más drenes (laterales y colectores o colectores entre sí) o donde cambian el diámetro o la pendiente del colector. Pueden ser prefabricadas (Figura 9a) o hechas in situ de mampostería u hormigón, pero también se pueden usar tubos de plástico rígido o de hormigón. Las cajas de unión pueden disponer de una cubeta de sedimentación e incluso rebasar la superficie del terreno (Figura 9b). La solera de la cubeta de sedimentación debe estar al menos 0,30 m por debajo del comienzo de la tubería de aguas abajo. Para facilitar la sedimentación en la cubeta, la salida de los laterales que desaguan en la caja debe colocarse al menos 0,10 m por encima de la parte superior del colector que sale de esta estructura. Las cajas de unión enterradas no estorban las labores agrícolas si su tapa se coloca al menos a 0,40 m por debajo de la superficie del terreno, pero también pueden quedar a la vista en caso de ser necesarias limpiezas o inspecciones. Si la tapa está a nivel del suelo la caja de unión es similar a una cámara de inspección, pero en este caso se entorpecen las labores agrícolas.

La posición de las cajas y de los pozos de registro enterrados (véase el Apartado *Pozos de registro*) debe quedar bien documentada, aunque, a pesar de ello, con frecuencia es difícil encontrarlas. Si no tienen componentes de acero, se debe colocar una tapa con barras metálicas a fin de identificar su presencia con un detector de metales.

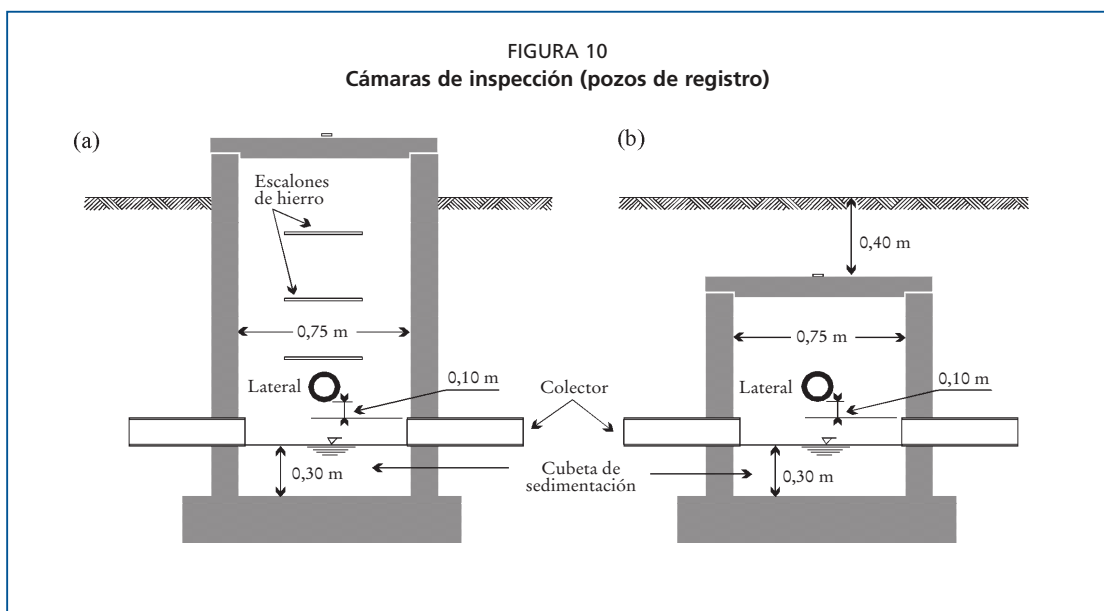
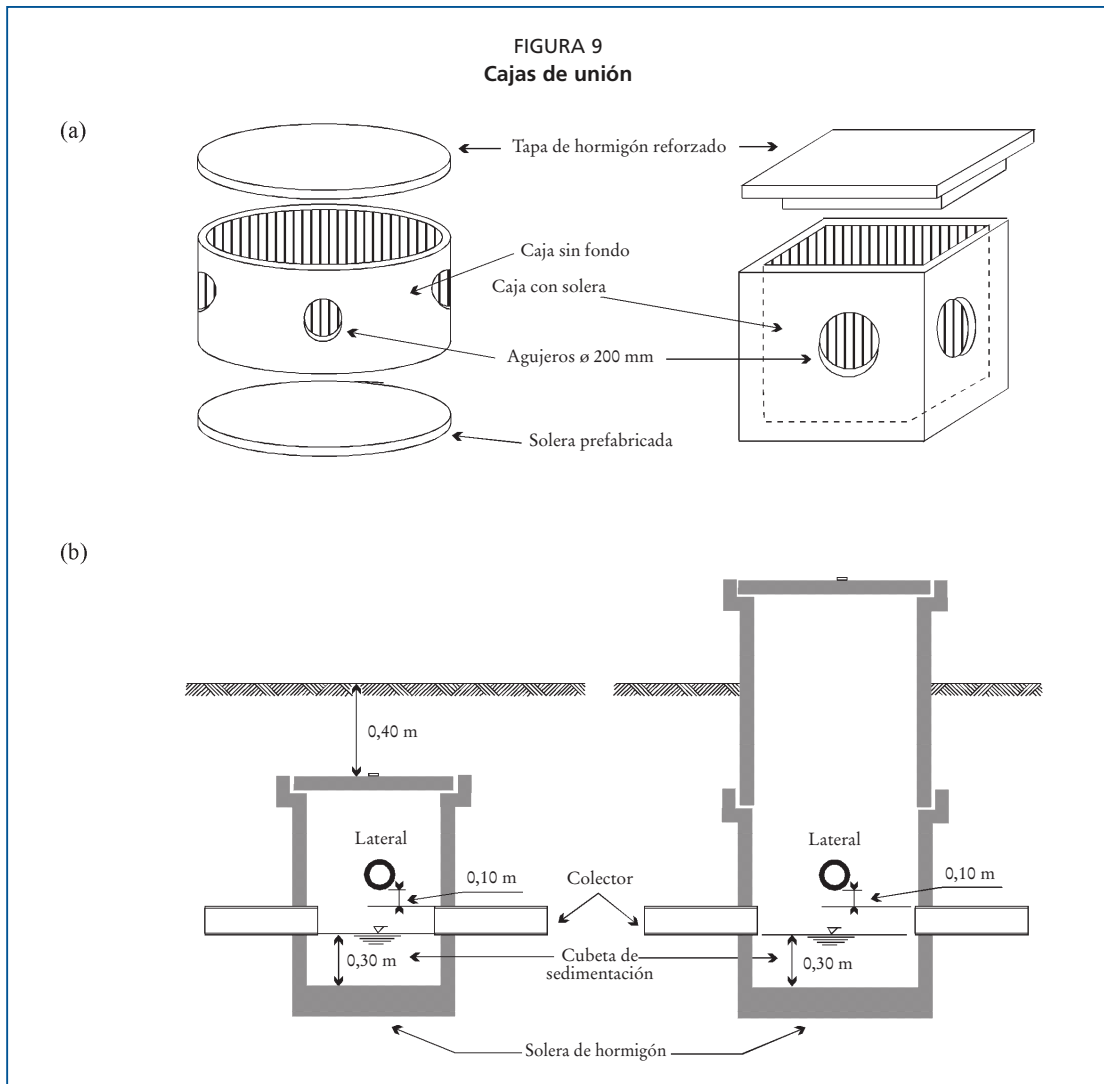
Pozos de registro

Las cámaras de inspección o pozos de registro difieren de las cajas de unión provistas de cubeta de sedimentos por disponer de accesos por si los drenes necesitan inspección o limpieza. Pueden construirse de mampostería o de hormigón pero también se ha utilizado con éxito madera de secuoya (Luthin, 1978). Los pozos de registro profundos se construyen con varios aros de hormigón reforzado. Para permitir el descenso de un operario hasta la línea de drenes deben tener la dimensión suficiente y disponer de peldaños metálicos fijados a la pared (Figura 10a). Si las tapas de los pozos de registro están por encima de la superficie del terreno interfieren las labores. Para evitar este problema se pueden construir tapas a 0,40 m de profundidad, con el inconveniente de la necesidad de excavar en cada inspección (Figura 10b).

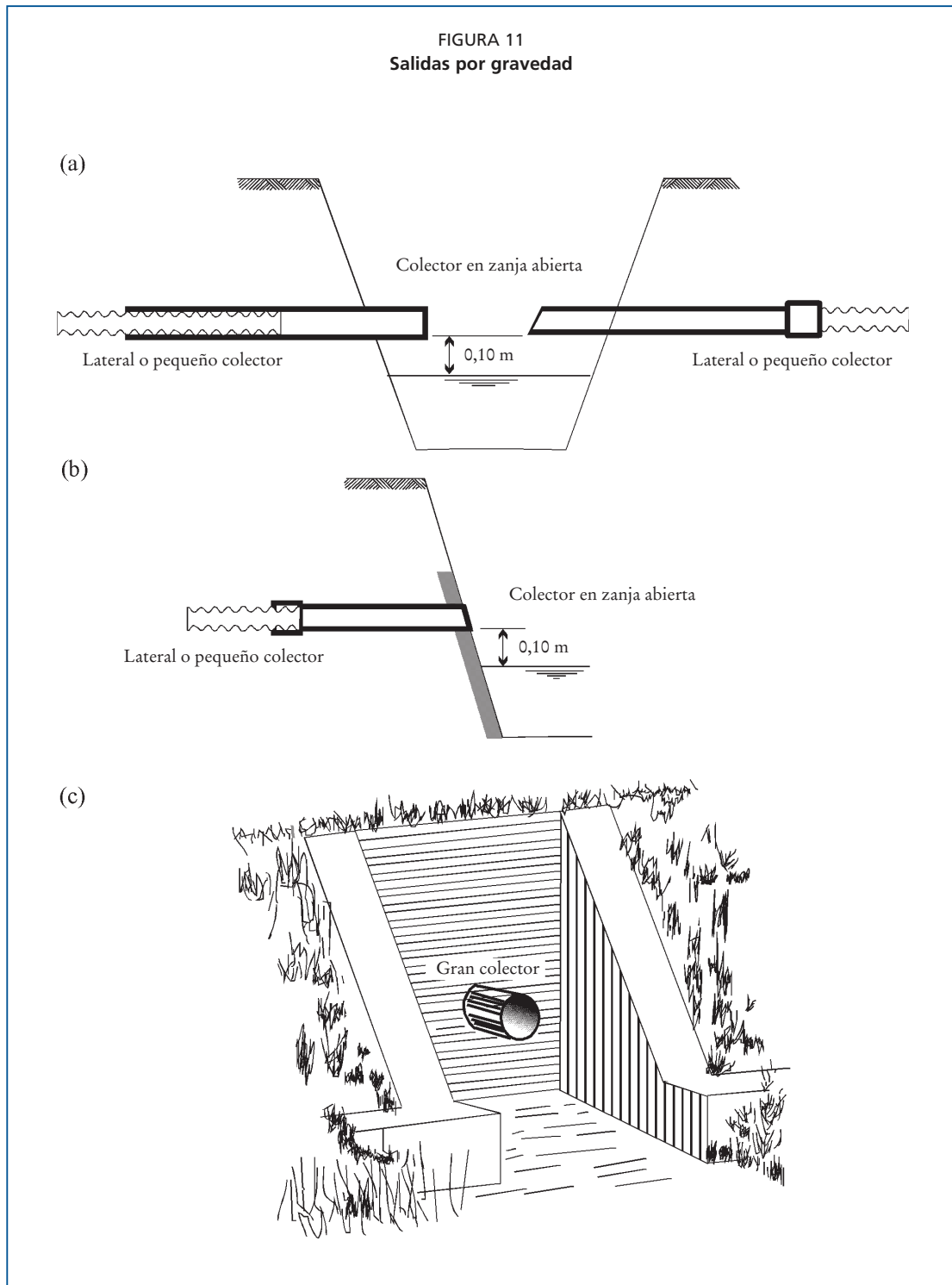
SALIDAS

Salidas por gravedad

La salida de drenes laterales y colectores debe protegerse si desaguan por gravedad a un sistema de drenes abiertos. La salida debe funcionar perfectamente ya que afecta al funcionamiento de todo el sistema de drenaje. La salida de drenes laterales y colectores pequeños puede protegerse mediante un tubo rígido sin perforar de plástico, acero galvanizado, hormigón reforzado u otros materiales. La longitud de estos tubos varía entre 1,5 y 5,0 m, dependiendo del diámetro de la tubería de drenaje, del riesgo de penetración de raíces de vegetación de los taludes y del riesgo de erosión debajo del



tubo o en el punto de desagüe. Cerca de la salida no debe utilizarse material envolvente alguno, especialmente grava, y los últimos metros del relleno de todo el perfil de la zanja del dren deben compactarse bien. El tubo de salida puede conectarse con la tubería de drenaje o recibirla y al menos la mitad de su longitud debe estar enterrada (Figura 11a).



La principal función de las salidas de drenes es impedir la erosión del talud de zanja. Para ello, el tubo sin perforar debe ser lo suficientemente largo para desaguar sobre el agua de la zanja. Para evitar desplomes puede ser necesario apoyarlo mediante un pequeño poste o una barra.

A veces se utilizan salidas más cortas que no rebasan el talud de zanja junto con piezas de protección del talud. Estas piezas pueden ser tubos de plástico cortados por la mitad o canaletas de cemento para conducir agua (Figura 11b). Este tipo de salidas también puede utilizarse cuando hay riesgo de obstrucciones de hielo.

A pesar de los esfuerzos realizados aún no se ha encontrado una solución adecuada para resolver el problema de la interferencia de las salidas con el mantenimiento de zanjas. Los tubos de salida de plástico resisten la corrosión debida a los compuestos químicos de suelo y agua, pero la quema de la vegetación de los taludes de zanja para su mantenimiento puede serles fatal.

Los drenes colectores más grandes justifican el uso de pequeñas estructuras de mampostería, hormigón hecho in situ o con elementos prefabricados (Figura 11c). Las salidas deben tener una rejilla desmontable para impedir la entrada de pequeños animales. Aunque las salidas a zanjas abiertas pueden estar sumergidas durante períodos cortos durante tormentas, en general no lo están y deben situarse a 0,10-0,15 m por encima del nivel de agua de la zanja correspondiente a flujo normal (Figura 11).

Salidas por bombeo

Se utilizan bombas para el desagüe de un sistema de drenaje a una zanja de evacuación si no es posible desaguar por gravedad porque la profundidad de la salida es insuficiente. Esta situación es común en sistemas de drenaje profundos diseñados para el control de salinidad en regiones áridas y semiáridas. En otras zonas, puede necesitarse bombeo si lo requieren los niveles del agua exterior en las salidas del sistema. Los drenes colectores desaguan en una cubeta de almacenamiento de agua con solera de hormigón, donde una bomba controlada mediante un flotador vacía periódicamente la cubeta (Figura 12). Las salidas por bombeo son más caras que las salidas por gravedad, no solo a causa del coste inicial de la inversión sino también a los costes de mantenimiento y al consumo de energía.

Las salidas por bombeo están equipadas con un motor (eléctrico o diesel), bombas y tuberías para elevar el agua de drenaje a una salida superficial donde desagua por gravedad. Las cubetas pequeñas pueden construirse con tubos de plástico de gran diámetro, de acero corrugado revestido de asfalto o con tubos de hormigón, mientras que las más grandes deben construirse con aros de hormigón reforzado, de mampostería o de hormigón reforzado.

ESTRUCTURAS ESPECIALES

Reductores de pendiente

En tierras con pendiente puede necesitarse un reductor de gradiente para en las tuberías de drenaje reducir la velocidad del agua si es excesiva e impedir su erosión y el subsiguiente movimiento del agua a través de canales formados exteriormente a la tubería. Pueden hacerse con tubos de plástico o de hormigón o construirse de mampostería o de hormigón (Figura 13). De hecho, son cajas de unión ciegas muy altas, con el tubo de entrada cerca de la parte superior y el tubo de salida cerca de la solera de la caja.

Dispositivos de limpieza

Aunque la limpieza de tuberías de drenaje bien diseñadas e instaladas adecuadamente debe ser la excepción y no la regla, hay circunstancias en que los drenes requieren limpieza periódica, p. ej. si se forma ocre de hierro. La limpieza de laterales de un sistema de drenaje compuesto con uniones ciegas solamente es posible si se desmantelan algunas de estas conexiones. Sin embargo, uniones especiales como las de la Figura 14

FIGURA 12
Cubeta de bombeo de drenaje

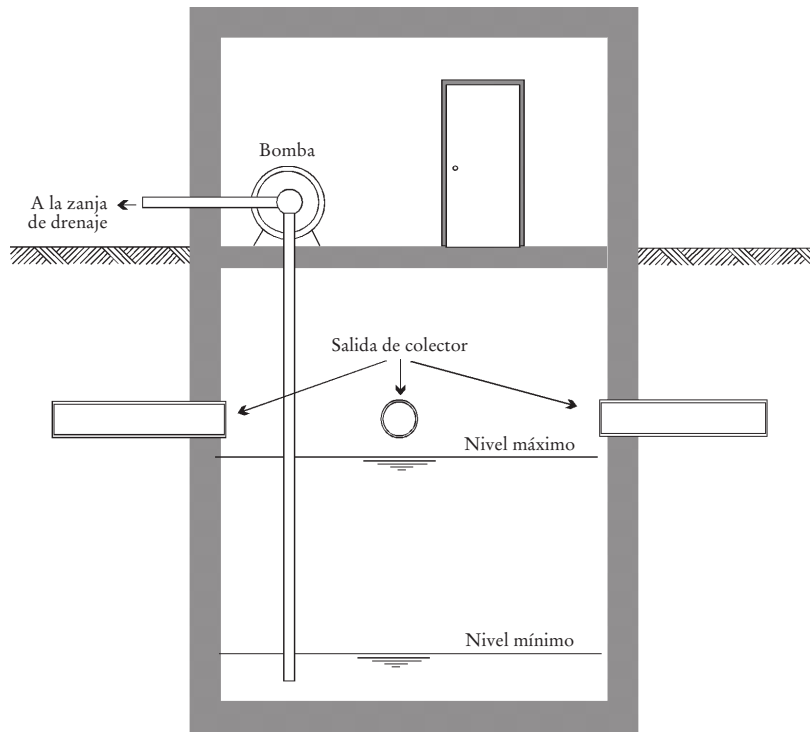
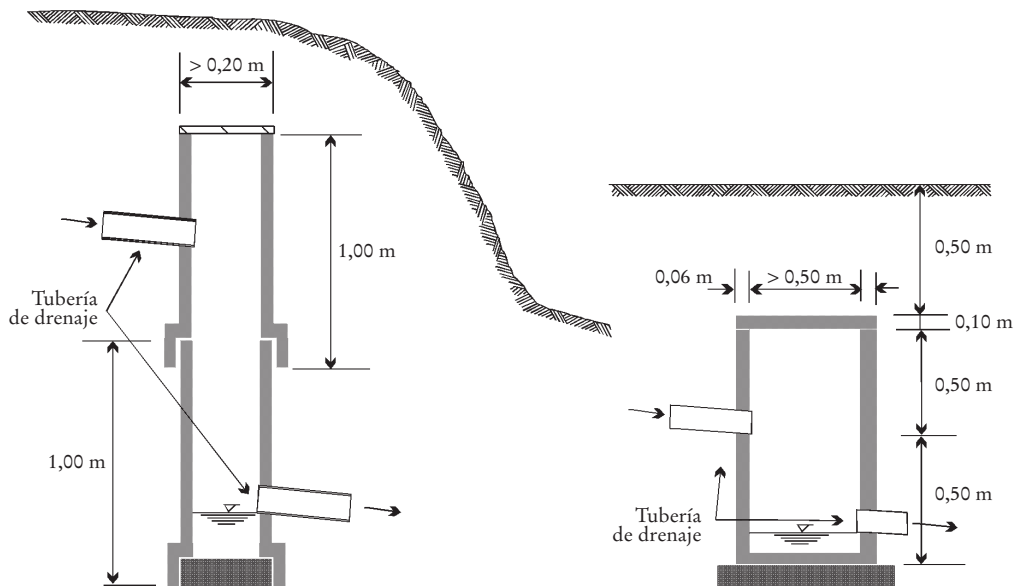
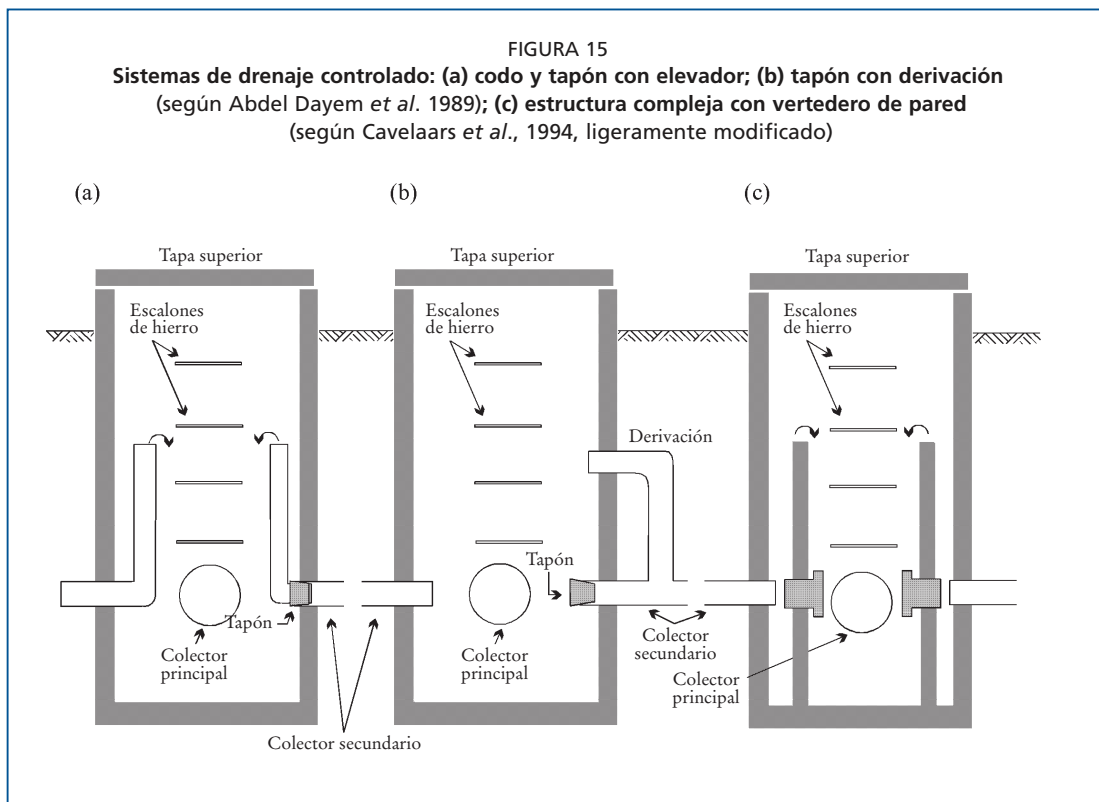
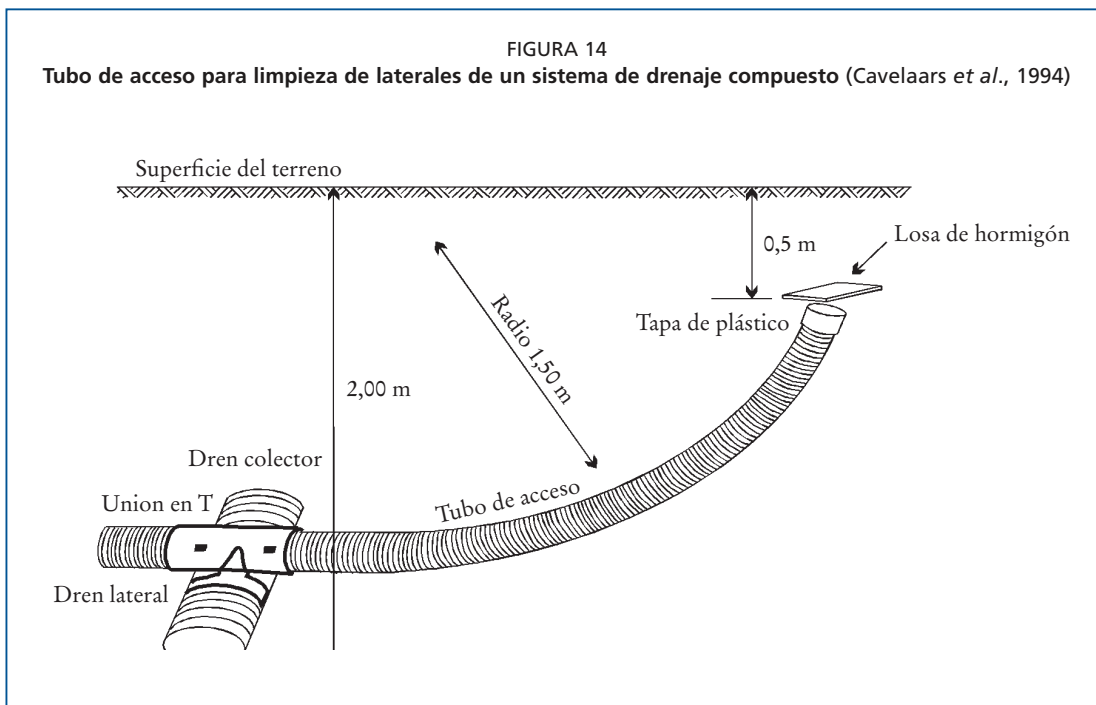


FIGURA 13
Reductores de gradiente (según Eggelmann, 1978)



facilitan la limpieza mediante inyección de agua, sin necesidad de excavar y desmantelar uniones. Una tapa de hormigón con barras de hierro situada encima del tubo de acceso permite su fácil localización desde la superficie del terreno con un detector de metales (Cavelaars *et al.*, 1994).



Estructuras para drenaje controlado y riego subterráneo

Puede haber razones para reducir temporalmente el drenaje, p. ej. por consideraciones ambientales, lavado injustificado y perjudicial de fertilizantes en invierno, riego suplementario y regímenes especiales de manejo de agua para arroz y otros cultivos. Los dispositivos para drenaje controlado pueden instalarse en zanjas abiertas o en drenes enterrados. Para impedir filtraciones alrededor de la estructura deben usarse tubos sin perforar de una longitud de 5 m que dirigen los drenes tanto hacia dentro de la estructura de control como hacia fuera de ella. Pueden utilizarse dispositivos de control sencillos como codos o tapones con un elevador (Figura 15a), o un tapón con una derivación (Figura 15b). En zanjas abiertas se utilizan frecuentemente vertederos de pared. También pueden utilizarse estructuras muy sofisticadas con vertederos de pared (Figura 15c), sensores para el control del nivel de agua, tanto de flotador como eléctricos, colocados en una cubeta situada ya en la línea del dren o a mitad de distancia entre drenes (Madramootoo *et al.*, FAO/ICID, 1997; Schwab y Fouss, 1999). Sin embargo, pueden fabricarse localmente dispositivos de control, sencillos y fiables, con los medios disponibles. Las estructuras de control se construyen de mampostería, de hormigón hecho in situ o con elementos prefabricados.

Algunas veces se utilizan tuberías colocadas sin pendiente que sirven tanto para drenaje como para riego, pero no es necesario mientras el gradiente sea suficientemente pequeño. Se necesitan controles automáticos para mantener el nivel de agua en las salidas de drenaje, que a su vez sirven como entrada de los sistemas de riego subterráneo. No debe practicarse riego subterráneo en zonas áridas donde la salinidad del suelo es un problema potencial.