

# Principios básicos para identificar problemas de drenaje en el cultivo de la palma



Jorge S. Torres A.

Boletín Técnico No. 34

Principios básicos para identificar  
problemas de drenaje en el cultivo  
de la palma

**Autor**

Jorge S. Torres A., Ph. D.  
Ingeniero de suelos y aguas  
Coordinador del Programa de Agronomía

Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma  
Bogotá, agosto de 2014

# Boletín Técnico No. 34

## Principios básicos para identificar problemas de drenaje en el cultivo de la palma

Publicación del Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma, Financiada por el Common Fund For Commodities-CFC, a través de la iniciativa del Fondo Latinoamericano para la Innovación en Palma de Aceite-Flipa y con la auditoría de la FAO, y el Fondo de Fomento Palmero administrado por Fedepalma.

### **Autor**

Jorge S. Torres A., Ph. D.  
Ingeniero de suelos y aguas  
Coordinador del Programa de Agronomía

### **Coordinación editorial**

Yolanda Moreno M.  
Esteban Mantilla

### **Corrección de estilo**

Hernando García Bustos

### **Diagramación**

Fredy Johan Espitia Ballesteros

### **Impresión**

Javegraf

### **Cenipalma**

Calle 20 A No. 43 A-50, piso 4  
PBX: (57-1) 2086300 Fax: (57-1) 3681152  
[www.cenipalma.org](http://www.cenipalma.org)  
Bogotá, D. C., Colombia

Agosto de 2014

ISBN: 978-958-8360-48-5

## Presentación

La palma de aceite es de origen tropical y su cultivo se ha establecido en zonas que presentan precipitaciones abundantes, siendo una condición que la precipitación mensual no sea inferior a 100 mm. Por lo general, es deseable también contar con precipitaciones anuales bien distribuidas que superen 2.500 mm para garantizar una buena producción de frutos y de aceite. En el país contamos con cuatro zonas palmeras y en tres de ellas ocurren periodos húmedos de ocho a nueve meses de duración. En la costa norte de Colombia el periodo seco abarca los meses de noviembre a marzo, siendo necesario la aplicación de riegos suplementarios. Durante los meses lluviosos, la precipitación excede los requerimientos hídricos de la palma y es normal observar problemas por exceso de humedad en los campos.

Las investigaciones de Cenipalma tendientes a contener y/o controlar la diseminación de la Pudrición del cogollo de la palma de aceite (PC), han demostrado que el agente causante de la enfermedad se dispersa en las aguas contaminadas que transportan las estructuras reproductivas de *Phytophthora palmivora*. Por esta razón, es importante evacuar adecuadamente los excesos de humedad de los cultivos de palma de aceite.

En general, los cultivos de palma se han establecido en terrenos dedicados a la ganadería y que no han sido adecuados previamente; es decir, no se han corregido accidentes topográficos para evitar que en los bajos o depresiones se acumule agua de riego o de las lluvias. En los periodos húmedos, es común observar aguas estancadas dentro de los campos de cultivo y en algunos casos se establecen niveles freáticos colgados, recargados por la precipitación. También pueden ocurrir niveles freáticos formados por la presencia de flujos de agua subterránea ascendente que llegan a la superficie creando excesos de humedad. En algunos sitios los excesos de humedad pueden provenir de fugas de agua desde ríos, quebradas, reservorios y lagunas que fluyen lateralmente hacia los terrenos más bajos causando niveles freáticos superficiales. Es muy importante establecer el origen de la fuente del exceso de humedad, la extensión del área afectada, la severidad del problema y la dirección del flujo del agua antes de plantear una solución técnica para el problema.

La cosecha continua de los frutos y el tráfico de los equipos en el campo bajo condiciones de suelo húmedo también causan hundimientos y charcos donde se acumula agua. La siembra de coberturas de leguminosas puede ayudar a reducir los excesos de humedad superficial a través del agua removida del suelo por evapotranspiración.

Este Boletín Técnico busca orientar a los palmicultores con una serie de herramientas y conceptos básicos para el manejo y la identificación de problemas del drenaje en los cultivos de palma, como un primer paso fundamental para el control de la Pudrición del cogollo (PC).

# Contenido

	Pág.
Estados del agua en el suelo.....	7
Causas de los problemas de drenaje.....	11
Drenaje superficial.....	13
Sistemas de drenaje superficial.....	14
Arreglo de la superficie.....	14
Drenajes localizados (sangrías).....	15
Drenajes superficiales en paralelo.....	16
Drenajes a través de la pendiente.....	16
Drenaje subterráneo.....	17
Sistemas de drenaje subterráneo.....	17
Tipos de drenajes.....	18
Fuentes de excesos.....	19
Flujo de agua en suelos saturados.....	19
Piezómetros.....	20
Pozos de observación.....	21
Gradiente hidráulico.....	21
Ecuación de flujo del agua.....	22
Información requerida para diseñar un sistema de drenaje.....	23
Estudios del agua subterránea.....	24
Densidad de la red de observación del nivel freático.....	24
Frecuencia de las lecturas.....	25
Mapas de la profundidad del nivel freático (isóbatas).....	25
Mapas de altura del nivel freático (isohipsas).....	25
Drenajes de alivio.....	26
Espaciamiento entre drenajes interceptores.....	28
Bibliografía.....	31



# Primera parte



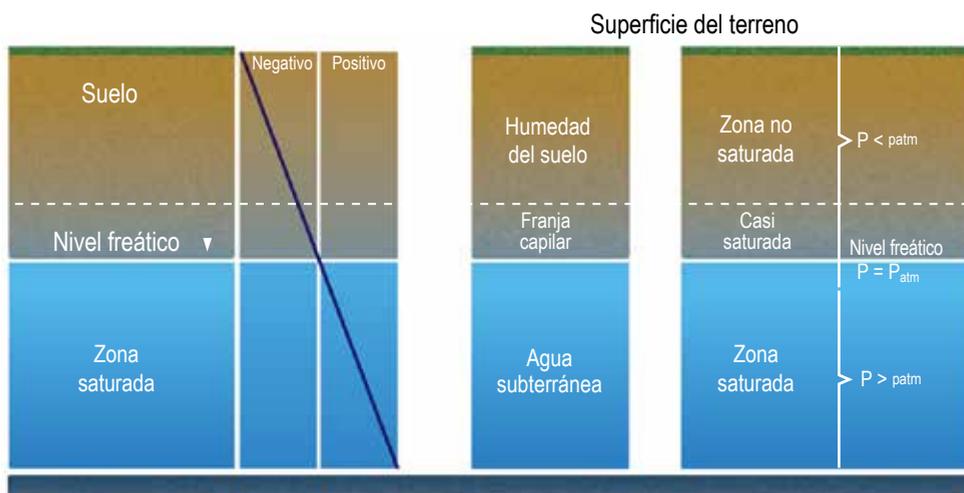
Foto: Jorge S. Torres A.

## Estados del agua en el suelo



## Estados del agua en el suelo

El nivel freático (NF) se define como la superficie del agua subterránea donde la presión del agua es igual a la atmosférica ( $P_{atm}=0$ ), y por debajo de ella se encuentra el medio saturado que está sometido al efecto de presiones positivas (Figura 1).



**Figura 1.** Estados del agua en el suelo y energía asociada.

En un suelo donde existe la presencia de nivel freático, en condiciones de equilibrio se establecen varias zonas diferenciadas por el contenido de humedad y por la energía asociada con el agua. La región situada por encima del NF se describe como un medio no saturado y el agua es sometida a presiones negativas debido a la fuerza de atracción del suelo por el agua. Es necesario resaltar que los cambios en el contenido de energía del agua en el suelo son graduales y continuos en la medida que el agua pasa del medio no saturado al saturado. Existe una zona por encima del NF donde el contenido de humedad está muy cercano a la saturación, pero la presión del agua es ligeramente negativa y se conoce con el nombre de franja capilar. El espesor de la franja capilar depende de la distribución del tamaño de las partículas y de los poros. En los suelos arcillosos, el espesor de la franja capilar puede ser superior a un metro, mientras que en los suelos arenosos puede ser de unos pocos centímetros.



# Segunda parte



Foto: Jorge S. Torres A.

## Causas de los problemas de drenaje



## Causas de los problemas de drenaje

La presencia de excesos de humedad en el suelo por periodos prolongados da origen a los problemas de drenaje agrícola que pueden tener causas diferentes; por ello, es necesario identificar en primera instancia la fuente del exceso de agua antes de proceder con el diseño de una solución de drenaje. En cualquier situación se debe prevenir que el nivel freático esté cercano a la superficie del suelo y afecte negativamente el desarrollo y producción de los cultivos. Entre las causas más comunes de los problemas de excesos de humedad tenemos:

- *Presencia de estratos impermeables.* Cuando existen estratos o capas endurecidas en el subsuelo, el agua de lluvia o riego no fluye verticalmente y se pueden presentar NF colgados. En estos casos la fuente de agua es localizada y entra al suelo por infiltración.
- *Agua artesisana.* El agua llega a la zona de las raíces por flujo vertical de agua a presión proveniente de un acuífero confinado por un punto de fuga. En este caso, el problema es localizado.
- *Fuentes externas de agua.* En el paisaje natural se pueden ubicar lagos, represas, reservorios, canales y ríos que aportan agua a través de flujo subterráneo lateral hacia las zonas más bajas en donde aflora el NF.
- *Baja permeabilidad.* Se debe a la presencia de estratos superficiales de baja permeabilidad que no transmiten el agua de manera rápida para evitar excesos de humedad. Existen suelos que tienen altos contenidos de arcilla y estructura masiva que en épocas de lluvias permanecen saturados por periodos prolongados.
- *Aplicación de láminas excesivas.* En este caso la ocurrencia de aguaceros muy intensos o la aplicación de riego por inundación pueden conducir al represamiento del agua debido a que se supera la capacidad natural de drenaje del suelo.
- *Zonas planas con poca pendiente.* Ocurre cuando el gradiente hidráulico dentro del suelo no es suficiente para obligar al agua a fluir hacia el NF.
- *Depresiones.* En los valles, el agua fluye hacia el sitio más bajo y muchas veces la topografía impide la salida natural del agua por gravedad.

### Drenaje superficial

Los problemas por drenaje superficial se presentan en terrenos planos con suelos de baja infiltración, poca permeabilidad y de topografía irregular con depresiones o bajos

que impiden la salida de los excesos de agua provenientes de las lluvias o del riego, dando origen a encharcamientos. El problema del drenaje superficial se magnifica con la presencia de suelos poco permeables. Adicionalmente, los canales de drenaje con baja capacidad de conducción se desbordan con facilidad creando inundación de los terrenos aledaños. En algunas ocasiones el nivel del agua en los ríos o lagos se eleva demasiado, creando curvas de remanso en los drenajes, desbordamiento e inundaciones por la falta de una salida libre del agua de drenaje.

Por lo anterior, el diseño de un sistema de drenaje efectivo requiere el diagnóstico e identificación acertada de la fuente de agua y reconocimiento de la forma como el agua llega al sitio del problema.

El drenaje superficial consiste en la evacuación controlada de los excesos de agua que se acumulan en la superficie de los terrenos por medio del mejoramiento de los cauces naturales, la construcción de canales de drenaje o mediante la corrección de irregularidades en la superficie de los campos.

Los métodos más comunes usados para corregir problemas de drenaje superficial incluyen la nivelación del terreno, corrección del cauce de las acequias o canales colectores que conducen las aguas a los drenajes naturales. También es importante asegurar una salida libre de las aguas de drenaje hacia los cauces naturales. En algunos casos, es necesario instalar compuertas o estaciones de bombeo para asegurar la salida del agua.

Los sistemas de drenaje superficial incluyen canales colectores y canales de evacuación del agua de exceso. Los canales son diseñados con la capacidad suficiente para remover la escorrentía generada por las lluvias y en un tiempo adecuado para evitar daños económicos a los cultivos. El coeficiente de drenaje es uno de los criterios más importantes para el diseño de un sistema de drenaje y especifica el caudal que se debe evacuar por unidad de área.

## Sistemas de drenaje superficial

Los sistemas de drenaje superficial más conocidos son: los drenajes localizados (san-grías), drenajes paralelos y los drenajes a través de la pendiente.

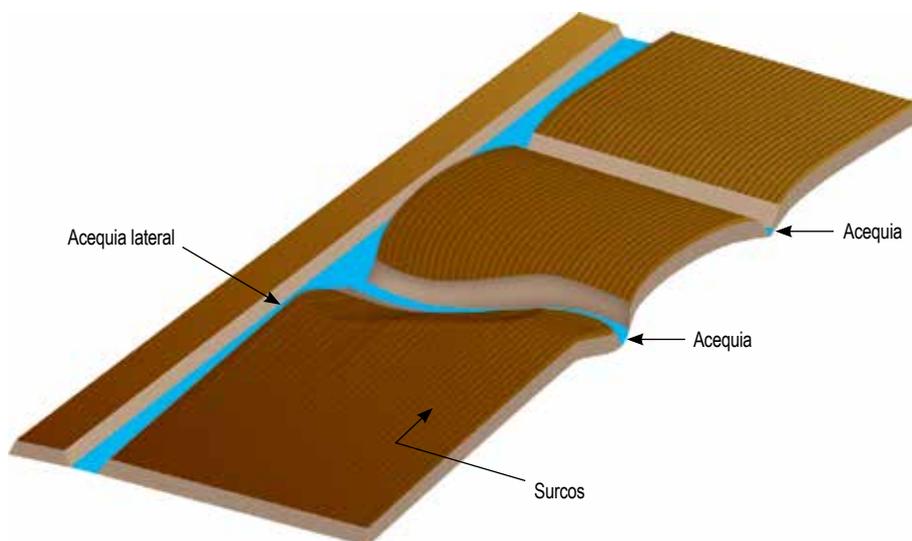
### Arreglo de la superficie

Esta alternativa se sigue en terrenos relativamente planos, donde se quiere alisar la superficie del terreno para eliminar diferencias de elevación, incluyendo depresiones pequeñas que no requieren movimiento de grandes volúmenes de suelo. Con el mejoramiento de la superficie no se busca modificar la topografía general del terreno.

Esta opción es muy útil para mejorar el drenaje superficial, facilitar el manejo de las aguas y el trabajo de los equipos y del sistema de cosecha. Los suelos deben ser suficientemente profundos para poder realizar cortes sin exponer a la superficie estratos que pueden afectar el desarrollo de los cultivos. Esta opción es muy importante para ser considerada en siembras nuevas y en las plantaciones ya establecidas en el momento de renovar el cultivo.

### Drenajes localizados (sangrías)

En los campos donde la topografía es plana e irregular y en las depresiones se acumula agua formando encharcamientos dispersos en el terreno; es necesario construir acequias que conecten las depresiones y ofrezcan una salida al agua estancada (Figura 2).



**Figura 2.** Acequias de drenaje superficial ajustadas a la topografía del campo.

En el caso de los cultivos de palma se observan charcos de agua dentro de los cultivos creados por el tránsito de bueyes y carretas. En estos casos puede ser útil el llenado de los huecos usando tractores con pala frontal para nivelar la superficie del terreno. Cuando el área del bajo requiere el movimiento de mucha tierra es preferible optar por los drenes o sangrías.

Las acequias de drenaje en este caso no deben sobrepasar los 30 cm de profundidad para evitar que interfieran con las labores agrícolas.

## Drenajes superficiales en paralelo

En sitios donde la topografía es plana y regular, los drenajes pueden ser trazados siguiendo un arreglo en paralelo, aunque no deben ser necesariamente equidistantes (Figura 3). La orientación de las acequias depende de la dirección de la pendiente del terreno, la ubicación de los canales primarios y secundarios, los sitios de salida del agua de drenaje y los sitios de entrada y salida de la maquinaria en el campo.

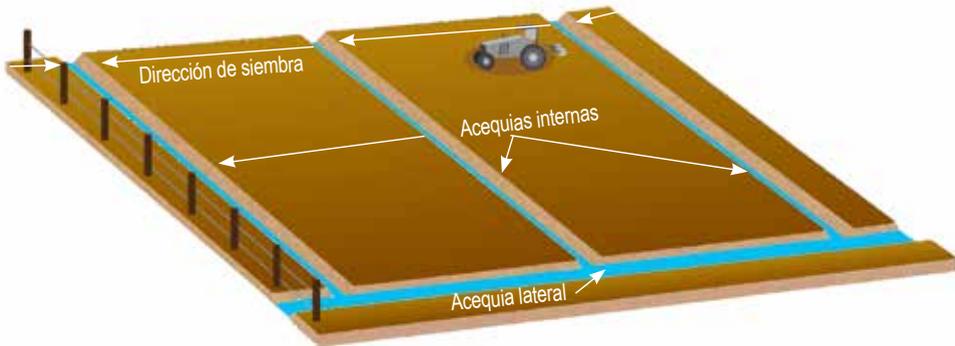


Figura 3. Drenajes superficiales (acequias) en paralelo.

## Drenajes a través de la pendiente

Este tipo de acequias en forma de bateas (con talud 6:1), facilitan el paso de la maquinaria agrícola y se utilizan para interceptar el agua en terrenos que tienen pendientes ligeras a moderadas y que pueden presentar problemas de excesos de humedad debido a su poca permeabilidad. También se usan para evacuar excesos de humedad provenientes de terrenos situados en lugares más altos.

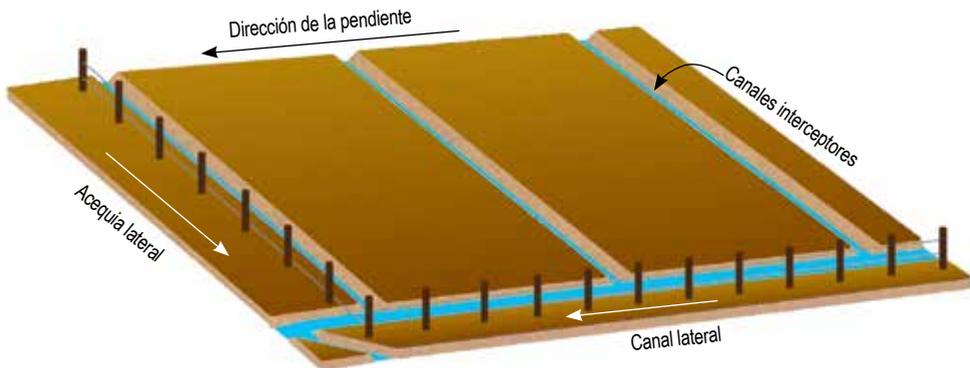


Figura 4. Drenajes a través de la pendiente.

## Drenaje subterráneo

El drenaje subterráneo consiste en la remoción de los excesos de agua localizados por debajo de la superficie del terreno. Los drenajes abiertos o los drenes entubados sirven para profundizar los niveles freáticos alimentados por la precipitación, agua de riego, fugas de agua desde canales, ríos y por aportes de agua artesiana. La profundidad óptima del nivel freático es función de la textura, estratigrafía del perfil, tipo de cultivo y de la calidad del agua freática, en términos de los riesgos de salinización del suelo. En suelos arcillosos y, en general, de texturas finas se forma una franja capilar que puede alcanzar alturas superiores a 1 metro por encima del nivel freático. En estos casos, si el agua freática es de buena calidad se puede manejar el NF como fuente de agua para subirrigación; pero si el agua freática tiene un alto contenido de sales, el NF se debe controlar a mayor profundidad para evitar riesgos de salinidad. Como regla general, el NF se debe manejar a profundidades superiores a 1,80 m en condiciones de aguas freáticas salinas.

En las zonas que están bajo riego permanente se debe aplicar una lámina de agua suficiente para el lavado de sales, establecer un balance de sales en el perfil y evitar así incrementos en los niveles de salinidad.

### Sistemas de drenaje subterráneo

Los sistemas de drenaje subterráneo se clasifican en drenajes de alivio y de interceptación, lo cual está de acuerdo con la forma como remueven el agua de drenaje.

**Drenajes de alivio.** Se usan para profundizar el NF en terrenos planos, donde la pendiente del NF es muy plana (poco gradiente hidráulico) y la fuente de agua principal proviene de la precipitación, riego o por aportes de agua artesiana.

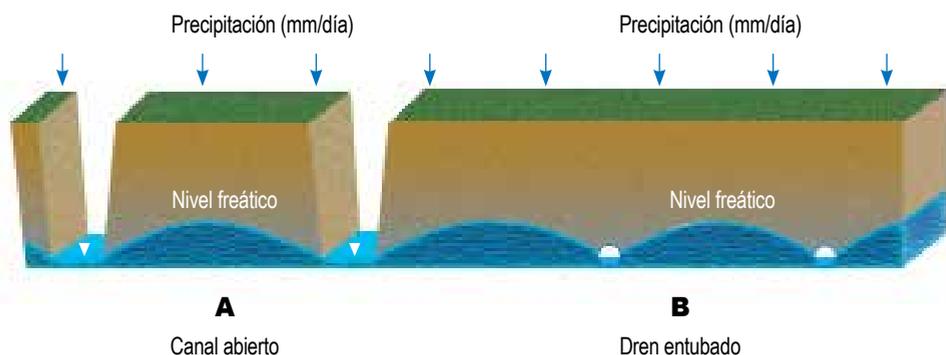


Figura 5. Canales abiertos y drenes entubados.

Los drenajes de alivio incluyen los canales abiertos y los drenes entubados. Es necesario tener en cuenta que la pendiente del nivel freático en los terrenos planos sigue muy de cerca el patrón de la topografía superficial.

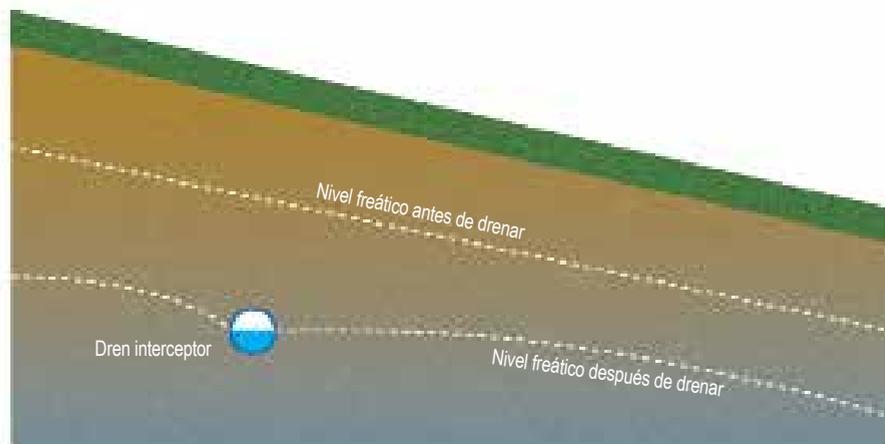
- **Drenes entubados.** Corresponden a tubos cortos de arcilla, concreto o asbesto cemento con uniones libres o tuberías de PVC revestidas con filtros de nailon, o PVC corrugado con perforaciones para la entrada del agua. Este tipo de drenes presentan ventajas, ya que una vez instalados (enterrados) quedan ocultos y no interfieren con las labores de campo, los costos de mantenimiento son menores y no se pierde área de cultivo.
- **Canales abiertos.** Los canales abiertos de drenaje se usan generalmente para drenar grandes extensiones de terreno, por la profundidad a la cual se construyen, tienen la posibilidad de conducir un gran rango de caudales y, además, pueden conducir tanto aguas de origen superficial como subterráneas. Se adaptan muy bien a terrenos planos y tienen un costo inicial de construcción más bajo que los drenes entubados; se facilita la inspección visual y su limpieza. En terrenos de muy poca pendiente con limitaciones para la salida del agua es la opción de drenaje más apropiada. Entre las desventajas de los canales abiertos se tiene el área útil de terreno que ocupan y la necesidad de hacer mantenimiento más frecuente que en los drenes entubados.

## Tipos de drenajes

Los arreglos geométricos más seguidos para la instalación de los sistemas de drenajes de alivio, ya sean en la forma de canales abiertos o de tubería enterrada, son:

- **Localizados.** Estos drenajes se instalan en terrenos de topografía ondulante y cuando los problemas de excesos de humedad son localizados. Se busca construir un drenaje colector común a donde se lleva el agua de los drenajes.
- **Paralelo.** Este sistema de drenajes se adapta muy bien a los terrenos planos con geometría regular y suelos de permeabilidad uniforme. En este caso, los drenajes laterales se trazan perpendiculares a los colectores.
- **Espina de pescado.** Este tipo de instalación de drenaje se acostumbra en terrenos con depresiones, donde el canal colector se instala en la dirección de la mayor pendiente y los drenajes laterales se trazan angulados para aprovechar la pendiente del terreno.
- **Drenajes de interceptación.** Este tipo de drenaje incluye los canales abiertos y los drenajes enterrados que se usan para cortar el flujo de agua proveniente de

zonas más altas. En el caso de los drenajes abiertos, se deben construir a una profundidad suficiente para que intercepte el nivel freático y las agua superficiales.



**Figura 6.** Drenajes de interceptación.

### Fuentes de excesos

En las zonas húmedas la principal fuente de los excesos de agua es la precipitación que se infiltra en el suelo, se percola y alimenta el nivel freático. También se pueden tener aportes de agua por artesianismo y por flujo lateral desde canales y ríos. Cuando los aportes de agua a un campo son mayores que la cantidad de agua que sale de él, los niveles freáticos se elevan generando problemas de drenaje interno que deben resolverse con la instalación de sistemas de drenaje artificial.

### Flujo de agua en suelos saturados

En los estudios de drenaje agrícola se desea conocer la profundidad del nivel freático y, por consiguiente, el movimiento y el flujo del agua subterránea. La ley de la conservación de la energía estipula que la energía no se crea ni se destruye en un sistema cerrado. Esta ley de la hidrodinámica se conoce como la ecuación de Bernoulli y establece que en un medio saturado la energía potencial ( $E$ ) del agua en un punto está dada por la suma de la energía cinética, de presión y gravitacional que se expresan por unidad de peso ( $\gamma$  = peso específico del agua):

**$E$  = energía cinética ( $v^2/2g$ ) + energía de presión ( $p/\gamma$ )/+ energía de elevación ( $z$ )**

$$E = v^2/2g + p/\gamma + z$$

La velocidad del flujo del agua en un suelo saturado ( $v$ ) es muy baja y, por consiguiente, el valor de la cabeza de velocidad ( $v^2/2g$ ) es despreciable. En esencia, la energía que causa el flujo del agua en el suelo (Figura 7) es la suma de la cabeza de presión ( $p/\gamma$ ) y de la cabeza de elevación ( $z$ ) que se conoce comúnmente como cabeza o carga hidráulica ( $H$ ), expresada en unidades de longitud.

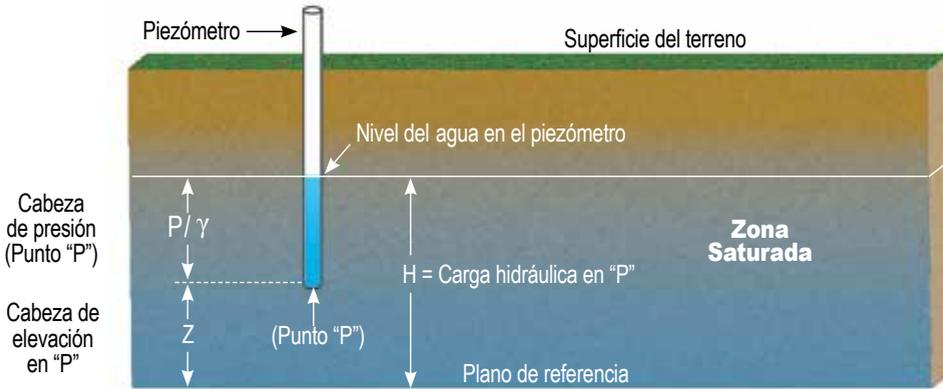


Figura 7. Descripción hidráulica de un piezómetro.

## Piezómetros

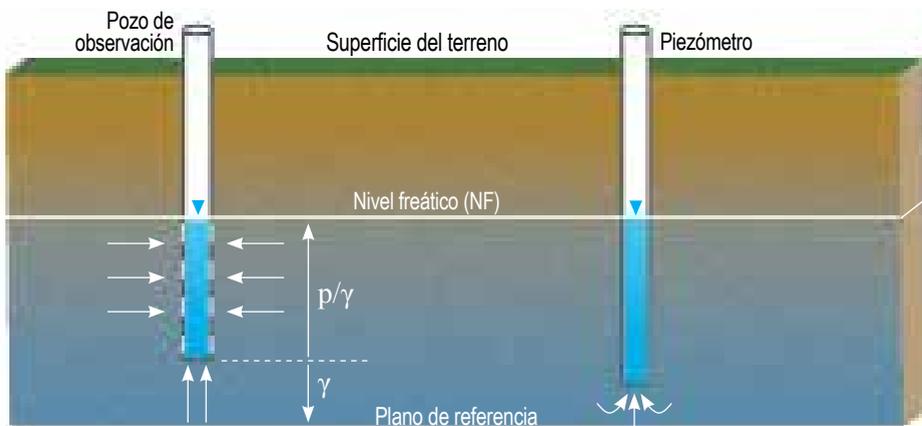
Los piezómetros se instalan para medir la carga hidráulica ( $H$ ) en un punto ( $P$ ) en el suelo saturado; con este fin se instalan tubos de hierro galvanizado de 2,5 a 5 cm de diámetro. Es necesario enterrar los tubos de los piezómetros a una profundidad suficiente que penetre el nivel freático. La altura del nivel del agua dentro del piezómetro corresponde al potencial de presión ( $p/\gamma$ ) y la carga gravitacional ( $z$ ) hace referencia a la altura del extremo inferior del piezómetro, medida a partir de un plano arbitrario de referencia o datum. Los piezómetros deben usarse en sitios en donde se sospecha la presencia de flujo artésiano y para localizar la posición del NF cuando ocurre flujo descendente en medios estratificados.

$$H = p/\gamma + z$$

En los sitios en donde se sospecha flujo vertical del agua subterránea se debe instalar una batería de piezómetros (2 o más). En medios estratificados es conveniente que se instale un piezómetro en cada estrato para poder definir con certeza la dirección del flujo del agua.

## Pozos de observación

Los pozos de observación corresponden a agujeros perforados dentro del suelo, para lo cual se usan barrenos de diámetro pequeño (2,5 a 3,8 cm). Si el suelo es arcilloso y el agujero no colapsa, no es necesario revestir el pozo. En caso contrario, se recomienda instalar un tubo de PVC perforado con agujeros de 1 mm a lo largo del tramo sumergido en el agua (Figura 8). Se acostumbra instalar una malla rodeada de un filtro de arena o grava fina para darle estabilidad al pozo de observación. El nivel freático se define como la superficie del agua freática en donde la presión es atmosférica; luego en la superficie del agua en el pozo de observación la presión es atmosférica ( $p/\gamma = 0$ ).



**Figura 8.** Diferencias entre el funcionamiento hidráulico de un pozo de observación y un piezómetro.

La altura del nivel del agua en el pozo de observación medida sobre un plano de referencia corresponde a la carga gravitacional ( $z$ ). En este caso, la carga hidráulica ( $H$ ) se calcula así:

$$H = p/\gamma + z$$

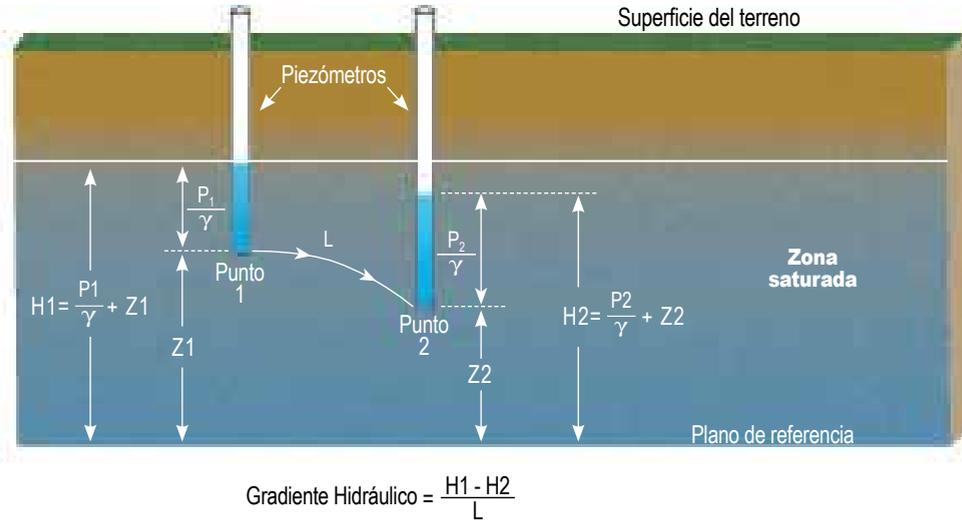
Si en el suelo no hay presencia de artesianismo, la carga hidráulica se puede medir con pozos de observación y/o piezómetros; el valor numérico debe ser igual.

## Gradiente hidráulico

El agua en el suelo se mueve desde un punto de mayor contenido de energía a otro punto de menor valor, y cuando la diferencia en potencial hidráulico ( $H_1-H_2$ ) se divide por la distancia entre los dos puntos ( $L$ ), se obtiene el gradiente de energía ( $i$ ) o gradiente hidráulico (Figura 9).

$$i = \Delta H/L = (H_1 - H_2)/L$$

$$i = [(p_1/\gamma + z_1) - (p_2/\gamma + z_2)]/L$$



**Figura 9.** Descripción gráfica del gradiente hidráulico entre los puntos  $P_1$  y  $P_2$ .

### Ecuación de flujo del agua

Hasta ahora se han descrito las fuerzas que determinan la dirección del flujo del agua en el suelo y se busca cuantificar la velocidad efectiva del flujo y la cantidad de agua que fluye en el suelo por unidad de área y de tiempo. La ecuación fundamental del flujo del agua en el suelo fue obtenida por Henry Darcy en 1856 y se conoce como la ley de Darcy, que establece que la velocidad aparente ( $V$ ) del agua a través de un medio poroso es proporcional al gradiente hidráulico ( $i = \Delta H/L$ ) multiplicado por un factor  $k$  de proporcionalidad conocido como la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad.

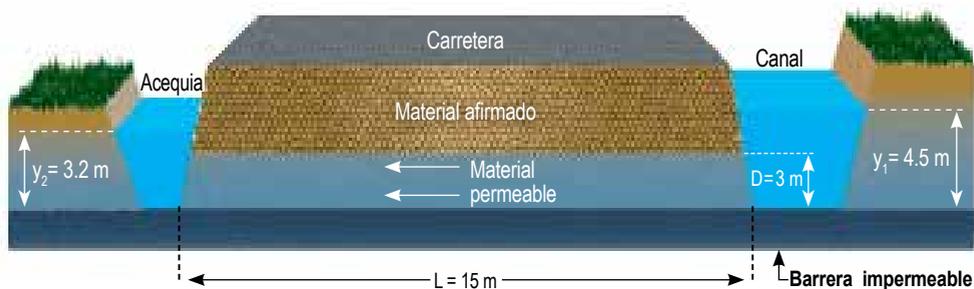
$$V = -k \cdot i$$

En la ecuación anterior se emplea un signo negativo para indicar que el flujo ocurre en la dirección en que decrece la carga hidráulica. Para calcular el flujo de agua ( $Q$ ) a través del medio poroso se toma el área ( $A$ ) del suelo, incluyendo el área ocupada por los sólidos del suelo en la dirección del flujo.

$$Q = A \cdot V = k \cdot i \cdot A$$

### Ejemplo de cálculo usando la ecuación de Darcy

Calcular el flujo ( $Q$ ) que pasa por debajo de una carretera en un tramo de vía de 500 m, desde un canal que es interceptado por una acequia como lo muestra la figura siguiente. La conductividad hidráulica del lecho de la carretera  $k = 0,4$  m/día. El ancho de la vía es 15 m, 2,5 m el espesor del lecho de la vía, 4,0 m el tirante del agua en el canal, 3,0 m el tirante del agua en la acequia.



$$V = 0,4 (4,5 - 3,2) / 15 = 0,027 \text{ m/día}$$

$$\text{Asumiendo un área de flujo de } A = 2,5 \times 400 = 1.000 \text{ m}^2$$

$$Q = V \cdot A = 0,034 \text{ m/día} \times 1.000 \text{ m}^2 = 34,7 \text{ m}^3/\text{día}$$

### Información requerida para diseñar un sistema de drenaje

1. Definir el plano y el área por drenar.
2. Determinar los puntos y cotas de salida del agua.
3. Realizar levantamiento de las curvas a nivel.
4. Ubicar acequias, puentes, pasos de vías.
5. Determinar las características hidráulicas del perfil de suelo.
6. Investigar la posición y fluctuación del nivel freático.
7. Determinar el área afectada por mal drenaje.
8. Determinar la fuente de los excesos de agua en el área problema.
9. Determinar la dirección del flujo del agua subterránea.
10. Determinar el mejor sistema de drenaje.

11. Diseñar el sistema.
12. Estimar los materiales, equipos requeridos y costos de la instalación.
13. Preparar una lista de especificaciones.

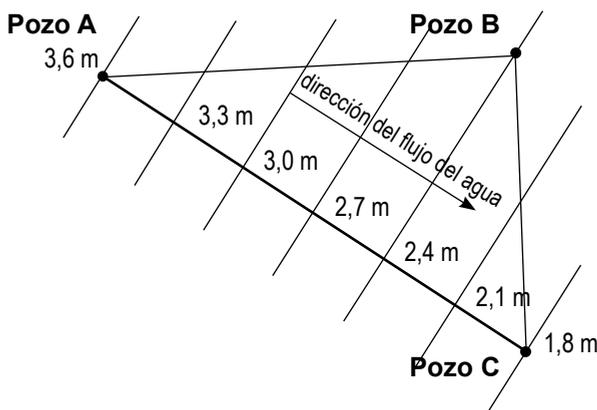
### Estudios del agua subterránea

Los estudios de drenajes se hacen mediante la instalación de pozos de observación y/o piezómetros para conocer la posición y fluctuación del nivel freático, elaborar planos de igual altura del NF o de las presiones piezométricas. Al conocer la posición del nivel freático se puede identificar la distribución espacial, las áreas afectadas y la severidad del problema de drenaje. Así como el tipo y la mejor disposición de los drenajes subterráneos.

Es importante contar con planos de los campos con curvas de nivel, de tal manera que conociendo la cota de los puntos de observación se pueda obtener la cota de la superficie freática.

### Densidad de la red de observación del nivel freático

Los pozos de observación o los piezómetros se deben distribuir estratégicamente en el área de estudio. Diferentes autores sugieren establecer una red en forma de cuadrícula que puede llegar a ser muy densa y costosa de instalar. Una forma práctica para iniciar la red de observación consiste en establecer una red triangular con amplio espaciamiento inicial. Los triángulos pueden ser de cualquier geometría y la red se puede agrandar en la medida en que los registros iniciales del nivel freático demuestren la necesidad de definir el detalle en algunos sitios del campo.



**Figura 11.** Método práctico de los tres puntos para distribuir los pozos de observación del nivel freático.

## Frecuencia de las lecturas

Los pozos de observación o piezómetros se deben leer con frecuencia quincenal y/o mensual durante un periodo largo, abarcando periodos secos y húmedos. Es importante establecer la posición más crítica del NF por su cercanía a la superficie, la cual debe utilizarse como base para el diseño de la solución de drenaje.

## Mapas de la profundidad del nivel freático (isóbatas)

Para cada fecha de lectura se debe elaborar un plano que muestre las líneas de igual profundidad del NF (Figura 12), conocido como plano de isóbatas y se usa para identificar y cuantificar las áreas afectadas por NF alto. Se acostumbra demarcar con diferentes colores, en los planos las zonas con NF, en los rangos de 0 a 50 cm, 50 a 100 y 100 a 150 cm de profundidad.

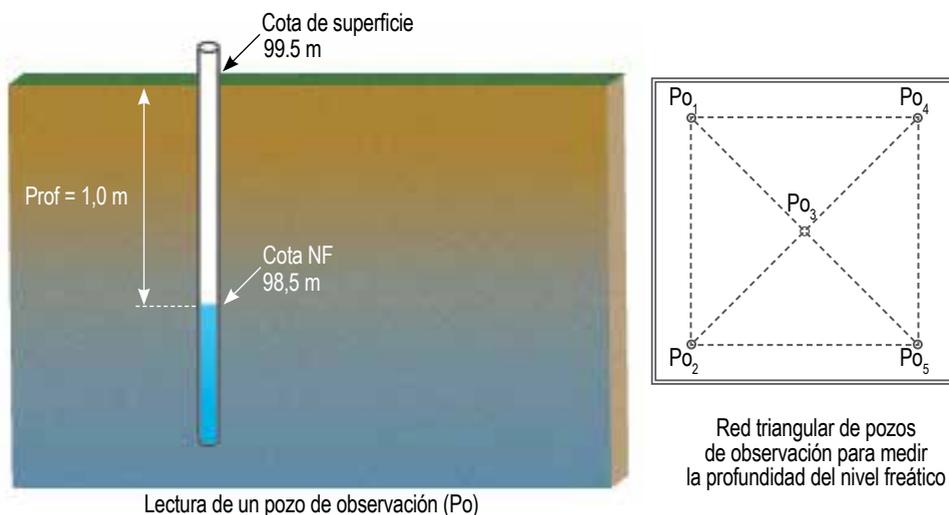


Figura 12. Red triangular de pozos de observación instalados para medir la profundidad del nivel freático (NF).

## Mapas de altura del nivel freático (isohipsas)

Las alturas o cotas del NF se obtienen al restar de la cota de superficie, la profundidad del nivel freático (Figura 12). Las líneas de igual altura del NF corresponden a líneas equipotenciales que muestran la forma de la superficie freática y se usan para identificar el punto de entrada del agua al campo afectado y la dirección del flujo del agua. Perpendicular a las líneas equipotenciales se trazan las líneas de flujo del agua. Es importante, en un mismo plano tener las curvas de nivel de la superficie del terreno y las alturas del NF, con el fin de ligar los accidentes topográficos con el comportamiento del NF.

## Drenajes de alivio

En las regiones húmedas donde el exceso de humedad (recargas) proviene de la precipitación o del agua de riego y además existen condiciones de equilibrio con el nivel freático, se puede usar la ecuación de Hooghoudt para calcular el espaciamiento entre los canales abiertos y/o drenes entubados (Figura 13).

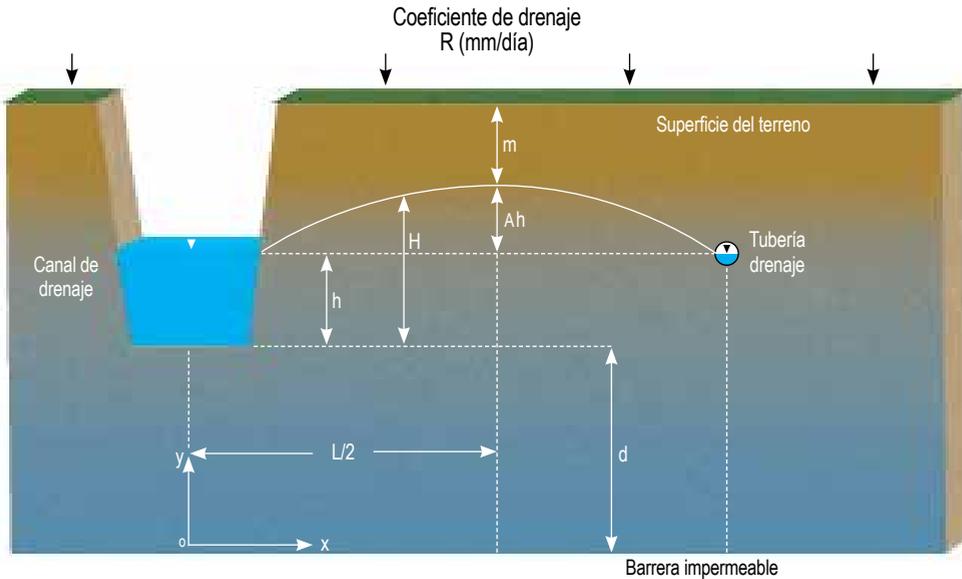


Figura 13. Diagrama descriptivo de los componentes de la ecuación de S. B. Hooghoudt para el cálculo del espaciamiento entre canales cuando existe una recarga constante.

En 1940 el ingeniero holandés S. B. Hooghoudt presentó una solución al problema de drenaje agrícola cuando la posición del nivel freático está en equilibrio con la precipitación o el riego. Lo cual equivale a decir que el nivel freático se elevará hasta cuando el flujo de agua hacia los drenes sea igual a la cantidad de agua de precipitación o riego que se infiltra a través de la superficie del terreno. La siguiente ecuación es válida tanto para el cálculo del espaciamiento entre canales abiertos y/o drenes entubados para medios homogéneos e isotrópicos:

$$L^2 = \frac{4K (H^2 - h^2 + 2dh - 2hd)}{R}$$

Con fines prácticos se puede asumir que el dren entubado está vacío ( $h=0$ ), lo cual simplifica la ecuación a la siguiente expresión válida para drenes entubados:

$$L^2 = \frac{4K (H^2 + 2dh)}{R}$$

En el caso de suelos estratificados donde el dren se coloca en la interfase de los dos estratos se puede usar la siguiente expresión para calcular el espaciamiento entre los drenes:

$$L^2 = \frac{4K_1 H^2}{R} + \frac{8K_2 dh}{R}$$

Existe la posibilidad de usar valores ponderados promedios para la conductividad hidráulica cuando se trata de medios estratificados, usando la siguiente ecuación:

$$\bar{K} = \frac{K_1 L_1 + K_2 L_2 + K_3 L_3 + \dots + L_i}{\Sigma L_i}$$

En la Figura 13, se presentan los parámetros requeridos para el cálculo del espaciamiento entre drenes, donde:

1. Se asume que el suelo es de perfil homogéneo y de conductividad hidráulica **K (cm/s)**.
2. Los drenajes están espaciados de manera paralela y a una distancia **L (m)**. Espaciamiento normal entre 10 y 30 metros.
3. El gradiente hidráulico en cualquier punto es igual a la pendiente del NF. El terreno es plano y la pendiente del NF es pequeña; lo cual garantiza flujo horizontal.
4. La ley de Darcy gobierna el flujo del agua a través del suelo.
5. Existe una barrera impermeable a una profundidad **d (m)**, por debajo del drenaje.
6. Seleccione un coeficiente de drenaje **R (mm/día)**, basado en el cultivo y tipo de suelo.
7. La profundidad del agua en el canal de drenaje es **h (m)**. En el caso de los drenes entubados se acostumbra asumir que **h=0**
8. El NF se establece a una profundidad (**m**) en el sitio intermedio entre dos drenes. El valor típico usado varía entre 1 y 2 metros. Este valor se debe seleccionar basados en el tipo de suelo y cultivo.
9. La profundidad del NF es **m**.
10. El origen de las coordenadas se toma sobre la barrera y por debajo de uno de los drenajes.

Cuando el agua freática es de buena calidad química no existen riesgos de salinización del suelo y los drenajes se pueden excavar a profundidades entre 60 y 90 cm.

En zonas semiáridas con presencia de aguas salinas, el NF se debe ubicar a mayor profundidad para disminuir así los riesgos de salinización del terreno (1,8 a 4 m). Al construir los drenajes a mayor profundidad se tiene la ventaja de poder incrementar el espaciamiento entre los drenajes.

Después de seleccionar la profundidad de los drenajes, se debe calcular el espaciamiento, el cual depende de la conductividad hidráulica, posición óptima del nivel freático, tipo de cultivo, profundidad del estrato impermeable y de la profundidad (cota) de la salida del canal colector principal.

Antes de iniciar una solución de drenaje artificial, es necesario prever la posibilidad de evacuar el agua de drenajes por gravedad para lo cual debe existir un buen gradiente; en el caso contrario, es indispensable construir una estación de bombeo.

### *Ejemplo de cálculo:*

Asumiendo que se cumplen los supuestos de la ecuación de Hooghoudt de equilibrio entre la precipitación y la posición del nivel freático, se puede calcular rápidamente el espaciamiento entre drenajes abiertos.

Se desea calcular el espaciamiento entre drenes (canales abiertos) para un predio donde se aplican riegos por gravedad con frecuencia de 15 días. La lámina aplicada por riego es de 160 mm con una eficiencia de aplicación de 50 %; lo cual resulta en un coeficiente de drenaje,  $R=5,33 \text{ mm/día}=0,0053 \text{ m/día}$ .

$$K= 1,3 \text{ m/día}, R=0,0053 \text{ m/día}, d=3 \text{ m}, H= 0,9\text{m}, h= 0,1\text{m}$$

$$L^2 = \frac{4K(H^2 - h^2 + 2dH - 2hd)}{R}$$

$$L^2 = \frac{4(1,3)(0,9^2 - 0,1^2 + 2 \times 3,0 \times 0,9 - 2 \times 0,1 \times 0,9)}{0,0053} = 5,906 \text{ m}^2$$

$$\text{Espaciamiento, } L = 77 \text{ m}$$

## Espaciamiento entre drenes interceptores

### *Ejemplo de cálculo:*

Este tipo de drenes se construyen en zonas de ladera y se pueden requerir uno o más. Normalmente, se construyen en sitios donde el suelo y subsuelo son relativamente permeables y la pendiente del NF es mayor que 2 %. El mayor efecto de abatimiento del NF ocurre después del dren (Figura 14).

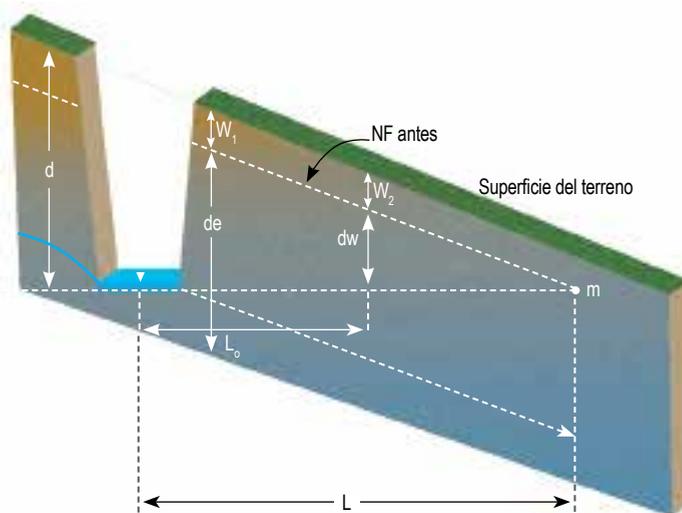


Figura 14. Vista transversal de un dren interceptor.

$$L_o = K.i/R (d_e - d_w + W_2)$$

Donde:

$L_o$  = Distancia por debajo del dren donde NF está a la profundidad requerida (**m**)

$d$  = Profundidad del dren (**m**)

$K$  = Conductividad hidráulica promedio por encima del dren

$R$  = Coeficiente de drenaje (**m/h**)

$i$  = Pendiente del NF antes de la instalación (**m/m**)

$d_e = d - W_1$ , profundidad efectiva del dren (**m**)

$d_w$  = Profundidad deseada y mínima del NF después del dren (**m**)

$W_1$  = Profundidad del NF en el sitio del dren (**m**)

$W_2$  = Profundidad del NF a la distancia  $L_o$ , antes de instalar el dren

$$L_o = (K.i)/R (d_e - d_w + W_2)$$

En la ecuación anterior,  $L_o$  y  $W_2$  son variables independientes y para encontrar la solución es necesario asumir un valor para  $W_2$ . Si el valor de  $W_2$  obtenido para la distancia  $L_o$  no coincide con el asumido, se deberá asumir otro valor hasta cuando el

valor obtenido para  $W_2$  a la distancia  $L_0$  coincide con el valor asumido en la ecuación de espaciamento para drenes interceptores.

*Ejemplo de cálculo:*

Determine la distancia a la cual un dren interceptor será efectivo para controlar el NF bajo las siguientes condiciones:  $K=0,15$  m/h,  $i=0,05$  m/m,  $R=0,0001$  m/h,  $d_e=1,98$  m,  $d_w=0,91$  m,  $W_1=0,45$  m

$$L_0 = (0,15 \text{ m/h})(0,05 \frac{m}{m}) / (0,0001 \frac{m}{h}) (1,98 \text{ m} - 0,91 \text{ m} + 0,45 \text{ m})$$

$$L_0 = 114 \text{ m}$$

A una distancia de 114 m por debajo del primer dren interceptor, la profundidad del NF será  $d_w=0,91$  m. El segundo dren interceptor se debe instalar a 114 m del primer dren. Si se desean colocar más drenes, es necesario recalcular la distancia entre ellos.

## Bibliografía

- USDA, Soil Conservation Service. 1973. Drainage of Agricultural Lands. A practical handbook for the planning, design, construction and maintenance of agricultural drainage systems. Water Information Center, INC. 430 p.
- Luthin, J. N. 1978. Drainage Engineering. Robert E. Krieger Publishing Co. New York. 281 p.
- ILRI. 1979. Drainage Principles and applications. Publication 16, volume I and II. Second revised edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands.
- Corey, A. T. 1971. Subsurface Drainage. Course Syllabus, AE 560. Colorado State University, Agricultural Engineering Department. Fort Collins, Colorado. USA. 160 p.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION. 1978. Drainage Manual. A water Resources Technical Publication. US. Government Printing Office, Washington. First edition. 286 p.



**Centro de Investigación en Palma de Aceite**  
Calle 20A N° 43A - 50 Piso 4 Bogotá D.C.  
PBX: 208 6300 Fax: 244 4711  
[www.cenipalma.org](http://www.cenipalma.org)

