



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES
PARA DRENAJE AGRÍCOLA**

José David González Villatoro

Asesorado por el MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj

Guatemala, septiembre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES
PARA DRENAJE AGRÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSÉ DAVID GONZÁLEZ VILLATORO
ASESORADO POR EL MSc. ING. JORAM MATÍAS GIL LAROJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de Lòpez
VOCAL III	Ing. Miguel Àngel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

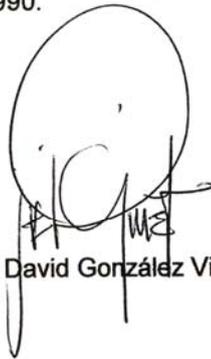
DECANO	Ing. Roberto Mayorga Rouge
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Marroquín Ziese
EXAMINADOR	Ing. Rafael Girón Bolaños
EXAMINADOR	Ing. José Rolando Barrios Morataya
SECRETARIO	Ing. René Andrino Guzmán

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES PARA DRENAJE AGRÍCOLA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 18 de octubre de 1,990.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'J' and 'D' followed by 'González Villatoro'.

José David González Villatoro

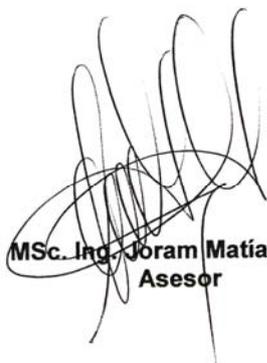
Guatemala, 15 de abril de 2,009

Ingeniero
Pedro Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica,
Escuela de Ingeniería Civil,
Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Aguilar:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de Graduación, titulado: **"METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES PARA DRENAJE AGRÍCOLA"**, del estudiante de Ingeniería Civil José David González Villatoro, el cual considero un buen aporte para la Ingeniería Civil, en un campo poco estudiado en nuestro país.

Por lo tanto el contenido llena los objetivos propuestos y al mismo tiempo sirve como una guía para el estudio del drenaje agrícola, recuperación y explotación de terrenos aptos para la agricultura.



MSc. Ing. Joram Matías Gil L.
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala,
23 de julio de 2009

FACULTAD DE INGENIERIA

Ingeniero
Sydney Alexander Samuels Milson
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

Estimado Ingeniero.

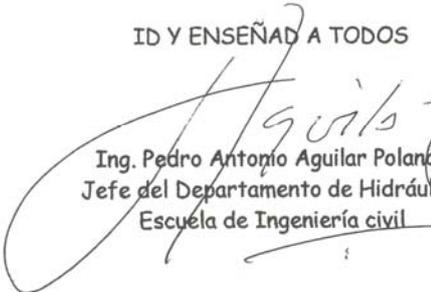
Atentamente y por este medio, envío a usted el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante JOSÉ DAVID GONZÁLEZ VILLATORO, con el título **METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES PARA DRENAJE AGRÍCOLA**.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo extendiendo la **APROBACIÓN DEL MISMO**, por parte del asesor MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por **APROBADO**; solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería civil



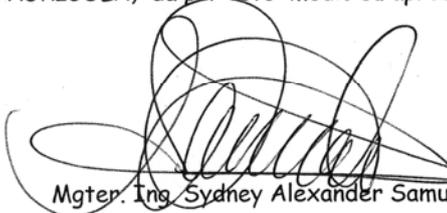
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Joram Matías Gil Laroj y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante José David González Villatoro, titulado **METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES PARA DRENAJE AGRÍCOLA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Mgter. Ing. Sydney Alexander Samuels Manson



Guatemala, septiembre 2009

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.332.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES PARA DRENAJE AGRÍCOLA**, presentado por el estudiante universitario **José David González Villatoro**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, septiembre de 2009



/gdech

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
JUSTIFICACIÓN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1 CAUSAS Y EFECTOS DEL PROBLEMA	
1.1 Precipitación	2
1.2 Inundaciones	3
1.3 Suelos y topografía	5
1.3.1 Características del suelo	5
1.3.2 Perfil del suelo	6
1.4 Consecuencias del problema	7
1.4.1 Daño a los cultivos	8
1.4.2 Daño a la infraestructura	11
1.4.3 Insalubridad	11
1.4.4 Mecanización	12
1.4.5 Daño a la economía	13
2 ESTUDIO Y DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	
2.1 Estudio preparatorio	15
2.1.1 Reconocimiento	15
2.1.2 Factibilidad	16
2.1.3 Diseño	16
2.2 Información existente	16
2.2.1 Fotografías aéreas	17

2.2.2	Mapas	17
2.2.3	Estudios	18
2.2.4	Informes	18
2.2.5	Información básica para el estudio de problemas de drenaje agrícola.	18
2.3	Reconocimiento de campo	20
2.3.1	Condición actual de las salidas	20
2.3.2	Magnitud y frecuencia de las inundaciones en el área	21
2.4	Diagnóstico del problema.	21
2.4.1	Fuentes del exceso de agua.	21

3 TEORÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN DRENAJE AGRÍCOLA.

3.1	Criterios sobre drenaje agrícola	25
3.2	Drenaje superficial	27
3.2.1	Parámetros para el diseño de la red colectora	28
3.2.2	Métodos de drenaje superficial	38
3.3	Drenaje subsuperficial o drenaje interno	49
3.3.1	Estudio preparatorio	50
3.3.2	Investigación del nivel del agua subsuperficial.	55
3.3.3	Red de observación	59
3.3.4	Lecturas del nivel del agua	63
3.3.5	Red básica de observación	66
3.3.6	Calidad del agua	67
3.3.7	Procesamiento de la información del agua subsuperficial	69

3.3.8 Evaluación de los datos del agua subsuperficial	73
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	87
APÉNDICE	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Perfil del suelo	9
2	Cálculo de la escorrentía	40
3	Control de la escorrentía	42
4	Factores topográficos de conformación	45
5	Variación de la pendiente tipo 1	47
6	Variación de la pendiente tipo 2	47
7	Emparejamiento con drenes	48
8	Camellones anchos	48
9	Secuencia para camellones anchos	51
10	Método de bancales	52
11	Sistema de siembra en camellones	53
12	Acuífero libre	61
13	Esquema piezómetro	61
14	Arroyo efluente	62
15	Distribución red piezométrica	62
16	Medición profundidad del agua	68
17	Limnómetro	68
18	Construcción isolíneas	75
19	Ejemplo de isolíneas	75

20	Construcción mapas de fluctuación	76
21	Hidrograma	76
22	Líneas equipotenciales y de flujo	80
23	Mapa de isolíneas	80
24	Líneas de piezómetros	81

CUADROS

1	Curvas de la escorrentía	39
---	--------------------------	----

GLOSARIO

Calicata:	Perforación hecha en la superficie del suelo para la determinación del nivel del agua subsuperficial.
Canal abierto:	Conducto en el que el líquido fluye con una superficie sometida a la presión atmosférica.
Capacidad de campo:	Es la máxima capacidad de retención de agua en condiciones de drenaje libre.
Coeficiente de drenaje:	Es el exceso de agua que debe removerse de un suelo por unidad de tiempo.
Conformación del terreno:	Trabajos realizados con el fin de modificar la superficie del terreno para la fácil evacuación del agua.
Isohipsas:	Líneas equipotenciales resultantes de un ploteo de los niveles absolutos del agua subsuperficial.
Lámina bruta:	Es la cantidad de agua que se aplica a un terreno contemplando la eficiencia del sistema de aplicación.
Lámina neta:	Es la cantidad de agua que un suelo soporta al ser afectado por un umbral de riego.
Lámina útil:	Es la cantidad de agua que un suelo soporta en condiciones normales.
Piezómetro:	Tubos abiertos en sus extremos, introducidos en el terreno hasta una profundidad donde se desea determinar la carga hidráulica.
Porosidad:	Relación entre el volumen ocupado por el agua y aire y el volumen bruto del mismo.
Porosidad drenable:	Cantidad de agua que puede ser drenada de un volumen de suelo saturado por efecto de la gravedad.

RESUMEN

En las regiones bajas de Guatemala, específicamente la costa sur, Petén, la región del Polochic, el litoral del Atlántico y muchas otras de iguales características, se vive año con año inundaciones que hacen que mucha de esta tierra productiva sea desaprovechada total o parcialmente para la producción agrícola.

Existen formas de reducir considerablemente este daño si se analizan los factores que intervienen en una inundación, cuál es el origen de las fuentes del exceso de agua, el tipo y condiciones del terreno que se pretende mejorar, tanto por sus características geológicas como topográficas y enmarcando cuáles son las consecuencias de este daño.

Ya definidos estos factores y sus consecuencias, debe hacerse un estudio que va desde un análisis preliminar de gabinete, con una visita de campo que permita concluir la gravedad del mismo y con ello definir la factibilidad de poder ejecutar un estudio más profundo. Este estudio puede incluir todo tipo de información que permita tener un panorama completo del problema a resolver.

Completada esta fase se procede a diagnosticar las posibles soluciones por medio de criterios teóricos y prácticos de acuerdo no sólo a la gravedad del problema sino a los recursos con que se cuente. Esta metodología de análisis y solución se denomina Drenaje Agrícola.

JUSTIFICACIÓN

El problema del drenaje superficial al igual que el drenaje interno, ha sido muy descuidado en nuestro medio. En la actualidad, la mayoría de los agricultores se limitan a evadir sus consecuencias mediante la programación de cultivos de ciclo corto que son plantados en épocas libres de problemas o en el peor de los casos, esas áreas afectadas se convierten en áreas marginales. En la época actual cuando la presión sobre el uso racional de la tierra es mayor y la producción es un reto para la agricultura, la necesidad de intensificar el uso de otras ha forzado a los productores más progresistas a buscar soluciones para los problemas de drenaje agrícola.

Dada la importancia del sector agropecuario en la economía nacional y que en el país la frontera agropecuaria se reduce cada vez más, se hace preciso considerar el aprovechamiento integral del recurso tierra, lo que es factible únicamente a través del uso del riego y consecuentemente del drenaje agrícola.

Con base en los estudios realizados en el país, se ha establecido que la precipitación pluvial no es uniforme, situación que no favorece un desarrollo adecuado de la actividad agropecuaria. En general, el uso de la tierra para cultivos se reduce a la época de lluvia.

En términos relativos, el nivel de producción aumentará considerablemente, si se utiliza el área total en la época de lluvia y en la época seca por el riego.

Por otro lado, el proyecto presentado en este estudio es congruente

con las políticas de desarrollo actuales, ya que a través del mismo se logrará la creación de empleos, tanto en la etapa de construcción de las obras de Ingeniería como, en la etapa de desarrollo del mismo, permitiendo también una mejor distribución del ingreso nacional, al abastecer el mercado nacional en primer lugar y en la medida de las posibilidades, abastecer el mercado externo, con un producto de alta calidad aplicando para ello el conocimiento y la técnica de Ingeniería Civil y específicamente la Hidráulica para dar soluciones efectivas y acordes al medio.

OBJETIVOS

GENERAL:

Proporcionar una guía para el estudio de los problemas de drenaje superficial y subsuperficial, presentando a la vez una serie de criterios sobre el diseño y construcción de un sistema de drenaje por medio de drenes abiertos.

ESPECÍFICOS:

1. Presentar criterios a efecto de incorporar a la producción agrícola, áreas que actualmente por falta de agua en verano y por exceso de lluvia en invierno, se encuentren ociosas o bien su producto es deficiente.
2. Introducir técnicas adecuadas en el manejo y uso de las tierras agrícolas, tomando en cuenta las condiciones ecológicas del país.
3. Presentar la planificación de las obras de drenaje necesarias para evitar los problemas inherentes del drenaje debido a los excesos de lluvia y riego.
4. Evaluar los dos componentes, riego y drenaje, como un solo sistema tanto para la inversión como para la operación y mantenimiento.
5. Evitar el peligro que representa la salinización de los suelos en las zonas

donde la capa freática se encuentra muy elevada al aplicar el riego o por el exceso natural en invierno.

6. Presentar ejemplos de los criterios de diseño en la determinación de caudales de influencia en la agricultura.

INTRODUCCIÓN

El drenaje agrícola tiene como objetivo principal mejorar las condiciones de humedad del suelo, con el fin de mejorar el uso agrícola de la tierra. Éste debe verse como una práctica del manejo integral del agua en la agricultura. De esta cuenta se han hecho estudios de introducción de agua con fines de riego en los que se ha considerado un estudio de drenaje, aunque la información es limitada.

La fuente principal de exceso de agua en las tierras agrícolas de la zona es actualmente la precipitación (P), ya que en términos generales, en el país la época de déficit está bien definida.

Este trabajo puede considerarse como un estudio preliminar que muestra una apreciación general del problema de drenaje, sus consecuencias, el estudio y análisis, así como métodos existentes para la solución de este tipo de problema.

En el capítulo uno se analiza las causas que originan los problemas de drenaje, el tipo de problemas así como su repercusión en la salud, infraestructura, producción y economía de la región.

El capítulo dos indica qué información se requiere para elaborar desde un estudio preliminar, hasta un estudio de factibilidad de proyecto.

Los criterios empleados en el estudio del problema de drenaje son tratados en el capítulo tres, donde se hace la división de los dos tipos de drenajes existentes superficial y subsuperficial.

1. CAUSAS Y EFECTOS DEL PROBLEMA

El exceso de agua sobre los terrenos puede ser ocasionado por cinco causas principales: precipitación, inundaciones, limitaciones topográficas, limitaciones edáficas y por exceso de agua; las inundaciones son consecuencia de la precipitación; y las limitaciones topográficas y edáficas contribuyen a agravar la acción de las causas anteriores. El riego, por su parte, actúa de igual manera que la precipitación al constituirse como una fuente adicional de agua.

El drenaje agrícola tiene como objeto eliminar los excesos de agua de los suelos a fin de proporcionar a los cultivos un medio adecuado para su normal desarrollo. El drenaje, según la localización de los excesos de agua puede ser: superficial o subsuperficial (interno), el drenaje superficial consiste en la remoción del exceso de agua sobre la superficie del terreno. El drenaje subsuperficial es por su parte el que se destina a evacuar los excesos de agua acumulados en el perfil del suelo.

La agricultura, a través de los tiempos ha tratado de seleccionar las tierras con menos problemas para la producción y como consecuencia de ello, las grandes civilizaciones siempre se ubicaron en áreas donde la producción de alimentos era relativamente fácil. Las expansiones y colonizaciones se han realizado hacia zonas áridas y semiáridas, produciéndose un mayor desarrollo del riego y quedando latente el problema de drenaje en las tierras húmedas y subhúmedas, desarrollándose la agricultura en forma extensiva de muy baja productividad.

Por otro lado, los sistemas de riego en el medio tienen en la actualidad más limitaciones por problemas de drenaje que por el propio riego. Los factores que tienen mayor influencia en los problemas de drenaje son los siguientes:

- a) Suelos con texturas finas que determinan poca capacidad de infiltración y permeabilidad;
- b) Topografía muy plana que limita el libre escurrimiento de las aguas;
- c) Microrelieve con pequeñas o medianas depresiones que impide el movimiento del agua;
- d) Terrenos de posición relativamente baja afectadas por la escorrentía de áreas de cotas superiores;
- e) La ocurrencia de deposiciones de limo sobre el terreno que provoca una impermeabilización de la superficie;
- f) Suelos con altos niveles freáticos.

Resulta un poco difícil jerarquizar la influencia de cada una de las causas principales de problemas de drenaje. Cada zona tiene características climáticas y edafológicas diferentes que influyen sobre el problema.

En todo caso, para que un problema de drenaje se dé, tiene que conjugarse una topografía plana, suelos poco permeables y altas precipitaciones o exceso de riego.

1.1 Precipitación

En las zonas húmedas, durante el período de lluvias, la precipitación es superior a la evaporación y como resultante existe un período de exceso de

humedad. Durante este período los suelos generalmente se encuentran bastante saturados y al ocurrir lluvias de altas intensidades, se produce una gran escorrentía superficial que fluye hacia las zonas más bajas de los terrenos, provocando problemas de inundación.

Por otra parte, la precipitación sobre las zonas montañosas aumentan los caudales de los cauces naturales, lo cual ocasiona una disminución de su capacidad para drenar las zonas bajas y llega en casos extremos a provocar el desbordamiento de los ríos.

1.2 Inundaciones

Las inundaciones comparten con la precipitación una de las principales causas del exceso de agua. Por efecto de grandes precipitaciones sobre la parte alta de las cuencas, los ríos aumentan su caudal y se desbordan en las zonas bajas, provocando problemas de inundación.

En muchas ocasiones, la inundación no ocurre directamente por desbordamientos de ríos, sino por incapacidad de éstos para recibir las aguas de las montañas y quebradas. El agua, al no tener salida, se rebalsa e inunda las áreas adyacentes a la desembocadura.

Las inundaciones ocurren principalmente por:

- a) Poca capacidad para drenar los cauces debido a limitaciones de pendiente o por sedimentación y obstáculos en los mismos;
- b) Ocurrencia de lluvias de magnitudes extraordinarias;

- c) Manejo no controlado de las cuencas de los ríos debido principalmente a la deforestación;
- d) Obstrucción de los drenajes naturales por obras mal concebidas (principalmente carreteras).

Las causas que originan las inundaciones también pueden clasificarse como directas e indirectas. Son directas las lluvias torrenciales, e indirectas la falta de lagos en la cuenca, la falta de bosques, la naturaleza del terreno, insuficiencia de la sección del cauce y pendientes pronunciadas también del cauce.

La precipitación puede ser retenida en el follaje de los bosques hasta en un 25% de la lluvia caída, la cual muy lentamente llega al suelo, retardando el escurrimiento, por lo que la deforestación irracional modifica el régimen de las aguas.

Los ríos y los canales pueden presentar tres períodos de inundación:

- a) Primer período: durante el cual el caudal que escurre aumenta rápidamente. Este período se denomina como crecida;
- b) Segundo período: en este período las aguas mantienen su máximo nivel en un corto período de tiempo y por consiguiente su máximo caudal; también se le denomina período de la onda llena;
- c) Tercer período: el nivel del agua desciende lentamente hasta llegar a su nivel normal. Este período se le denomina como período de decrecencia.

1.3 Suelos y topografía

Las características físicas de los suelos, textura y estructura, están íntimamente ligados a la topografía. En la formación de los suelos sujetos a problemas de drenaje, el relieve ha tenido una influencia determinante en la caracterización de los mismos. Los problemas de exceso de agua generalmente se presentan en terrenos que forman planicies aluviales.

En las zonas donde han ocurrido las deposiciones de material más fino, normalmente, las más bajas, es donde el problema reviste mayor gravedad.

En tal caso, para un proyecto de riego es posible que aparezcan evidencias de exceso de agua si el manejo es inadecuado en su conducción, distribución y frecuencia del agua al cultivo.

1.3.1 Características del suelo

El suelo está formado por tres fases:

- a) Fase sólida: formada e integrada en un 50% por las partículas o material del suelo, que no tienen variación volumétrica. Está compuesta por una fracción orgánica y una inorgánica. La primera de ellas formada por residuos vegetales en diferentes grados de descomposición, de la cual depende su actividad biológica. La segunda está formada por partículas primarias de arena, limo y arcilla, compuestas mineralógicamente de cuarzo, cloruros,

feldespato, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y magnesio;

- b) Fase líquida: se refiere a la humedad del suelo, con aproximadamente un 25% de su formación;
- c) Fase gaseosa: otro 25% conformado por contenido de aire en los espacios vacíos del suelo.

Las fases gaseosa y líquida del suelo son inversamente proporcionales, ya que a medida que aumenta el contenido de aire, disminuye el contenido de agua y viceversa.

1.3.2 Perfil del suelo

El suelo está formado de roca rota y descompuesta al que se han añadido los productos de la destrucción de la materia orgánica, a los que se les llama humus, los cuales provienen de generaciones previas de las plantas. Los factores que determinan el tipo específico de suelos que se desarrollarán son los siguientes: 1) tipo de roca original, 2) pendiente del terreno, 3) clima, 4) vida vegetal y animal y 5) tiempo de exposición. La importancia relativa de estos factores es muy discutida.

Un suelo comienza en la superficie y se extiende hacia abajo a expensas del lecho rocoso, el cual lo alimenta. Un suelo maduro que ha continuado creciendo hacia abajo se equilibra con la erosión en la cima y tiene un perfil de suelo constituido de tres capas u horizontes que son los siguientes:

1.3.2.1 Horizonte A

También llamado suelo de la cima, del cual la materia fina es llevada hacia abajo y la materia soluble lixiviada. El horizonte A es generalmente de

color negro a pardo oscuro; debido a la presencia de materia orgánica descompuesta. La superficie del suelo es el horizonte O, la capa de material vegetal y animal muerto y en diferentes estados de descomposición, conocida como humus.

1.3.2.2 Horizonte B

Bajo el horizonte A se encuentra el horizonte B, el cual es la capa de suelo que recibe los materiales trasladados desde el horizonte(s) superior(es), es llamada también subsuelo. Algunos minerales, especialmente el hierro, forman capas como costras que impiden el drenaje a través del suelo. El horizonte E es una capa de suelo pálido, la cual separa el horizonte B del horizonte A, en la cual las arcillas y los minerales han sido llevados del horizonte E al B, quedando una alta concentración de arena o limo.

1.3.2.3 Horizonte C

Llamado también roca paterna destruida que gradúa hacia abajo a la capa rocosa no intemperizada.

Todo el material suelto que yace sobre la capa rocosa como un manto, se conoce apropiadamente con el nombre de mantillo, figura 1 La meteorización de las rocas puede ser química (por disolución por agua) o física (fragmentación por cambios de temperatura y por sales).

1.4 Consecuencias del problema

El encharcamiento de los terrenos por problemas de drenaje trae como consecuencia una serie de limitaciones para la utilización de los mismos. Los

daños pueden variar según sea la magnitud del área afectada. Cuanto mayor sea el área a considerar, mucho más complicada será la determinación de los daños. Éstos pueden enumerarse de acuerdo a su importancia en la zona a considerar.

1.4.1 Daño a los cultivos

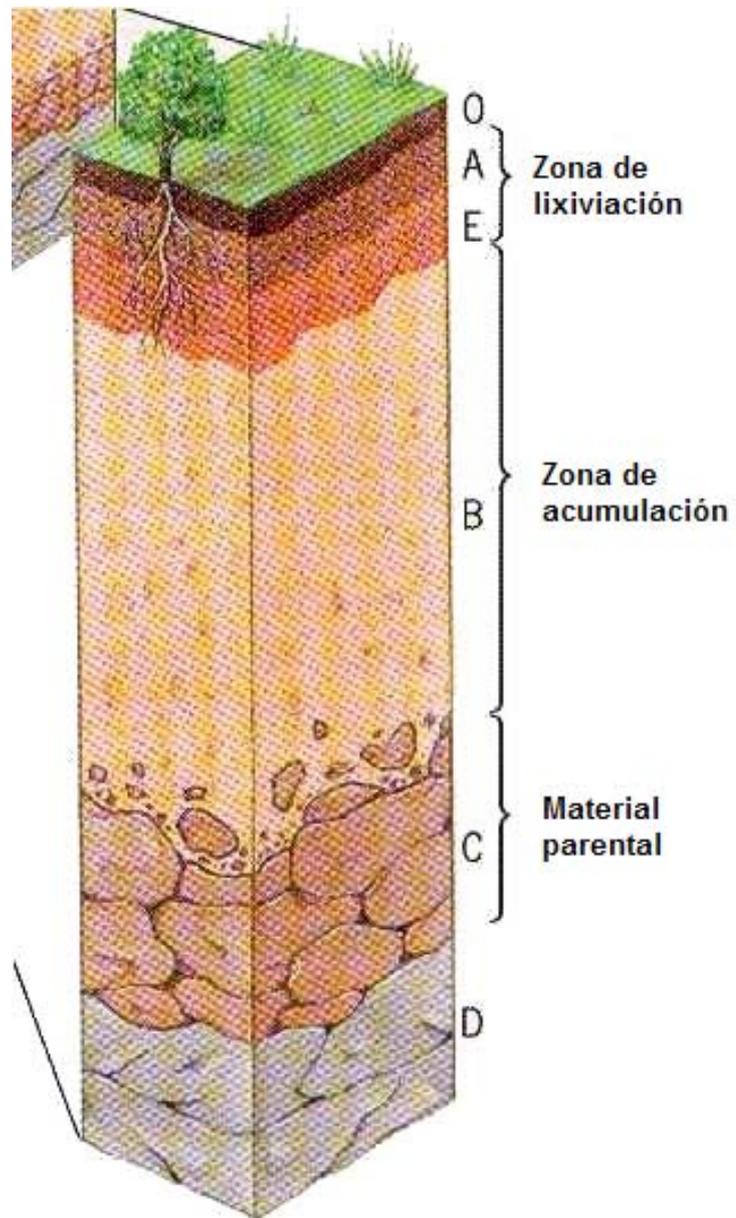
La principal consecuencia de los problemas de un mal drenaje para los cultivos es la limitación del intercambio gaseoso entre las raíces de las plantas y la atmósfera. Es de esta forma como se produce una deficiencia de oxígeno y una concentración de CO₂ que perjudica a las plantas y puede llegar a causarles la muerte si el efecto se prolonga. Los daños a la producción dependerán de:

- Clase de cultivo.
- Duración del efecto de inundación.
- Estado de desarrollo del cultivo.
- Condiciones climáticas.

1.4.1.1 Clase de cultivo

La resistencia de los cultivos a las inundaciones es un carácter específico propio de cada planta. Por ejemplo, los cultivos hortícolas resisten pocas horas si no tienen drenaje, mientras que el arroz prefiere la permanencia de una lámina de agua constante. Los cereales y otros cultivos de ciclo corto pueden permitir inundaciones de 24 horas y en el caso de los pastos resisten inundaciones de 3 o más días.

Figura 1. Perfil de suelo con sus horizontes característicos



1.4.1.3 Estado de desarrollo del cultivo

El efecto nocivo del exceso de agua tiene mayor importancia cuando éste ocurre en un período crítico del crecimiento de la planta siendo menos dañino que cuando el cultivo está en una fase menos crítica; la que dependiendo del cultivo, puede ser en el primer período de formación del fruto. En los climas húmedos, cuando no se cuenta con un buen sistema de drenaje, la programación de los cultivos tiene necesariamente que realizarse en función del drenaje.

1.4.1.4 Condiciones climáticas

La temperatura, evaporación, humedad relativa, los vientos, etc., son factores climáticos que tienen influencia sobre la actividad fisiológica de la planta. En los climas de altas temperaturas, al ocurrir una inundación, la planta está sujeta a un gran régimen de evapotranspiración que consecuentemente requiere mayores cantidades de agua y oxígeno. En los climas templados, las bajas temperaturas reducen la actividad fisiológica de la planta, hasta llegar al estado de letargo, siendo no tan perjudiciales para la planta.

Cuando el suelo está sometido constantemente a inundaciones, el agua escurrida puede transportar sedimentos limosos, que al depositarse, sellan los poros del suelo, impidiendo la penetración del agua. En estos casos, aún cuando los suelos tengan una capacidad de infiltración aceptable, no pueden recibir el agua por la presencia de esta película impermeable; esto determina que, después de pasar el efecto de las inundaciones, las lluvias posteriores son muy poco efectivas.

1.4.2 Daño a la infraestructura

Las construcciones rurales se ven muy afectadas por los problemas graves de drenaje superficial y subsuperficial. Cuando por efecto del mal drenaje se producen asentamientos e inestabilidad y los daños pueden llegar a sumas considerables al afectar casas, edificios, galeras, además obras de infraestructura como alcantarillas, puentes, canales y aun maquinaria y equipo.

Las vías de comunicación sufren considerables daños y en muchos casos en forma cíclica, que reducen la vida útil y provocan demoras en la intercomunicación terrestre, asimismo, la edificación de obras civiles nuevas se torna mucho más difícil por el alto costo que representa preparar un terreno en esas condiciones con influencia agrícola.

1.4.3 Insalubridad

Las aguas, al permanecer mucho más tiempo sobre el terreno pueden ocasionar problemas sanitarios que afectan al hombre, animales y plantas, debido a la presencia de plagas y enfermedades.

1.4.3.1 Sanidad humana

El hombre es muy perjudicado por las plagas que transmiten enfermedades y que generalmente viven en los charcos y lagunas. Las principales enfermedades que se producen en lugares anegados son: la fiebre amarilla, el paludismo y el dengue.

1.4.3.2 Sanidad animal

Las infecciones producidas por hongos y parásitos son muy comunes en el ganado debido a ambientes húmedos.

1.4.3.3 Problemas fitosanitarios

- a) Enfermedades: el exceso de agua crea un ambiente favorable al desarrollo de enfermedades fungosas que atacan a los cultivos. En muchos casos, esto es una limitación para el cultivo de ciertas especies,
- b) Plagas: en los suelos encharcados, la dificultad del control de las plagas en los cultivos, permite una gran incidencia del ataque de éstas y por consiguiente aumentan los daños a la producción,
- c) Malas hierbas: la permanencia de agua provoca la invasión de hierbas indeseables, ya que muchas veces pueden desarrollarse mejor que los cultivos.

1.4.4 Mecanización

Uno de los grandes problemas de los suelos mal drenados, es la dificultad para el uso de equipo mecánico para el desarrollo de la agroindustria. Cuando esto ocurre se tiene como consecuencia:

- Dificultad para la preparación del suelo y por consiguiente deficiencia;
- Dificultad para la cosecha;

- Pérdida de tiempo en las labores agrícolas;
- Mala programación de la siembra;
- Daño a la maquinaria y equipo;
- Compactación de los suelos.

1.4.5 Daño a la economía

Como es lógico suponer, debido al mal aprovechamiento de la tierra, el nivel de producción se reduce considerablemente, provocando bajo rendimiento y rentabilidad en la explotación agropecuaria. A esto se suman los otros factores descritos anteriormente, los que al interrelacionarlos complican la situación de una región sometida a estas condiciones.

2. ESTUDIO Y DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

La investigación de drenaje agrícola tiene como finalidad la realización de una serie de estudios que sirvan para diagnosticar la gravedad de la extensión del problema y a la vez proporcionar elementos necesarios para proponer soluciones. Un estudio de drenaje tiene que suministrar información para determinar:

- La existencia actual o futura de exceso de agua;
- La existencia de una salida adecuada para la eliminación del exceso de agua;
- Cuál es la fuente del exceso de agua;
- La posibilidad de que los suelos sean adecuadamente drenados;
- Cuánta agua debe ser removida;
- Qué sistema o método de drenaje dará los mejores resultados.

2.1 Estudios preparatorio

El estudio puede ser realizado a diferentes niveles de acuerdo al objetivo del análisis, grado de precisión requerida y detalle de la información disponible. Puede dividirse en tres clases: reconocimiento, factibilidad y diseño.

2.1.1 Reconocimiento

Este estudio tiene la finalidad de hacer una estimación de la factibilidad técnica y económica del proyecto. Deben darse recomendaciones sobre las investigaciones que deberán realizarse en los estudios posteriores.

2.1.2 Factibilidad

Se debe efectuar con el suficiente detalle para determinar la magnitud del problema, tipo de solución a adoptar, estimación de costos y beneficios del proyecto. Por lo general, se logra con este estudio una serie de alternativas, a nivel de anteproyecto, las cuales se evalúan para escoger la más conveniente.

2.1.3 Diseño

Se realiza con todos los detalles necesarios para preparar el plan final. Este estudio debe contener toda la información requerida para la inmediata construcción del sistema.

Es importante hacer notar que para el estudio de los problemas de drenaje de un área determinada, no es necesario pasar por las tres etapas de estudio, ya que en el momento de plantearse la necesidad de resolver un problema, el análisis de la información existente así como de antecedentes, permite pasar del reconocimiento al diseño.

Cuando exista un proyecto prediseñado en desuso se puede prescindir de las primeras fases como un lineamiento rígido, concretándose a la utilización de la información existente y a un reconocimiento de campo.

2.2 Información existente

Antes de comenzar el estudio se hace necesario recopilar toda la información existente, ordenándola de tal manera que esté fácilmente

disponible. Esta información debe incluir: fotografías aéreas, mapas de distintas escalas, estudios e informes.

2.2.1 Fotografías aéreas

Pares estereoscópicos de fotografías aéreas a distintas escalas que permitan obtener información valiosa ya que con base en ellas se elaboran mapas, estudios geológicos, de suelos, bosques, de carreteras, etc.

2.2.2 Mapas

Es necesario contar con mapas con escalas que oscilen entre 1:50,000 a 1:5,000, que sirvan como base para el estudio y que a la vez muestren los detalles que tengan importancia para la concepción del proyecto.

Entre los mapas más importantes están:

- Planimétricos
- Altimétricos
- De infraestructura existente
- Catastrales
- De suelos y geología

En nuestro medio es muy difícil contar con una gama completa de estos mapas, sin embargo, aunque la información es limitada y en muchos casos obsoleta, debe aprovecharse al máximo, dándole mucho énfasis a la visita de campo que puede ayudar a enriquecer esta información.

2.2.3 Estudios

Es necesario contar con estudios como:

- De drenaje existente;
- De suelos;
- Geológico;
- De cuencas;
- Agroeconómicos y económicos;
- Topográficos;
- Hidrológicos, etc.

2.2.4 Informes

Los informes y registros de datos que es necesaria su recopilación son los siguientes:

- Informes de los levantamientos y estudios antes mencionados;
- Registros de lluvia, fluviometría, niveles de los ríos, etc.;
- Informe de daños;
- Informe de estudios de suelos;
- Datos del rendimiento de cultivos, etc.

2.2.5 Información básica para el estudio del drenaje agrícola

De los estudios enumerados anteriormente, son básicos para el diagnóstico del problema, los suelos, hidrológicos, climatológicos, topográficos y agroeconómico.

2.2.5.1 Suelos

Deben contener la siguiente información:

- a) Textura y estructura;
- b) Uso actual y potencial;
- c) Características fijas relacionadas con la humedad;
- d) Permeabilidad e infiltración;
- e) Limitaciones, etc.

2.2.5.2 Hidrológica

Deben contener lo siguiente:

- a) Precipitaciones máximas y su frecuencia;
- b) Curvas de intensidad, frecuencia y duración;
- c) Crecientes máximas y su frecuencia;
- d) Capacidad de los cauces naturales;
- e) Balances hidrológicos;
- f) Otras informaciones climatológicas.

2.2.5.3 Topografía

En ellos debe estar contenido:

- a) Levantamiento plani-altimétrico;
- b) Perfiles del terreno;
- c) Secciones de cauces importantes naturales o de canales existentes.

2.2.5.4 Agroeconómicos

Deben incluir lo siguiente:

- a) Cultivos más importantes del área;
- b) Valor actual de la producción;
- c) Beneficios esperados del drenaje;
- d) Costos unitarios de obras de drenaje;
- e) Tolerancia de los cultivos al mal drenaje.

El detalle de estos estudios dependerá del nivel del informe a realizar.

2.3 Reconocimiento de campo

El reconocimiento de campo debe ser realizado al inicio del estudio. Debe constatarse aspectos relevantes como:

2.3.1 Condición actual de salidas

Es necesario determinar las capacidades de los desagües de salida, tomando en cuenta el uso actual y potencial de la tierra. Un buen desagüe de salida tiene necesariamente que ser capaz de transportar el volumen de agua de desagüe diseñado. En caso de no lograrse, debe determinarse la posibilidad de ampliación de éstos. El cálculo de la capacidad de las salidas debe hacerse en función del uso más intensivo a que se espera someter las tierras. En el caso de que por razones topográficas no existe una salida natural que funcione por gravedad, hay que considerar una alternativa de bombeo antes de declarar el problema sin solución.

2.3.2 Magnitud y frecuencia de las inundaciones en el área.

Mediante observaciones de campo y con la información existente, se determinará el área sujeta a problemas de inundación y la frecuencia con que éstos se presentan, siendo estas determinaciones un factor limitante para la solución con drenaje.

Se hace necesario efectuar investigaciones que determinen:

- a) La posibilidad de erosión en los canales de drenaje;
- b) La frecuencia de las inundaciones;
- c) Época de ocurrencia de las inundaciones;
- d) Profundidad y duración de las inundaciones;
- e) Acumulación excesiva de sedimentos (asolvamiento); y
- f) Uso de la tierra.

2.4 Diagnóstico del problema

El análisis de todos estos estudios básicos permite diagnosticar el problema y la gravedad del mismo; cuando se conozcan bien todas las características del problema, se pueden tomar decisiones sobre la manera de solucionarlo.

2.4.1 Fuentes del exceso de agua

Las fuentes que producen exceso de agua y ocasionan problemas de drenaje agrícola en una determinada área pueden clasificarse en cuatro grupos:

2.4.1.1 Precipitación

Las lluvias de altas intensidades pueden causar problemas de inundación cuando la capacidad natural de drenaje del área y la velocidad de infiltración de los suelos sea reducida. Precipitaciones del orden de los 100 mm/día junto con suelos pesados y de topografía plana crean generalmente un problema de drenaje, ejemplo: la costa sur de Guatemala.

2.4.1.2 Escorrentía de aguas adyacentes

Este tipo de problema se presenta en áreas donde las condiciones topográficas cambian y la escorrentía tiene una gran velocidad que luego llegan a áreas planas de poca capacidad de drenaje. Esto produce una mayor gravedad cuando se encuentra asociado con las lluvias. Cuando el exceso es de este tipo puede solucionarse por medio de canales interceptores.

2.4.1.3 Desbordamiento de los ríos

En áreas planas es un caso muy frecuente ya que el nivel de los ríos muchas veces es igual o superior a las tierras vecinas, lo que implica que al ocurrir grandes crecidas, el río rebalsa sus bancos naturales y se desborda inundando las tierras más bajas. En este caso, las medidas de control de inundaciones más utilizadas son los diques marginales y las presas de control de avenidas.

2.4.1.4 Exceso de riego

Una fuente superficial de agua como lo constituye el riego, actúa como un arroyo afluente, es decir, como un canal de recarga de la napa freática;

adelante se analiza este problema ampliamente. Un hidrograma de una zona sometida a riego ya sea un pozo de observación, un piezómetro o un sondeo abierto, da a conocer los períodos del año en los que existen excesos que requieren ser controlados por medio de drenaje agrícola.

En muchas ocasiones los problemas de drenaje son ocasionados por dos, tres y hasta cuatro fuentes de exceso de agua mencionadas y éstas, a su vez, se presentan en forma aislada o conjuntamente. Cuando ocurren grandes precipitaciones de larga duración, es muy probable la presencia de las cuatro fuentes de exceso al mismo tiempo.

3. TEORÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN DRENAJE AGRÍCOLA.

3.1 Criterios sobre drenaje agrícola

Muchos de los aspectos de la ingeniería del drenaje de tierras son aplicables tanto a problemas de zonas húmedas como a las regiones áridas, en este estudio se analiza únicamente el primer caso.

Los drenes o zanjas superficiales y los drenes subsuperficiales aisladamente o en combinación, pueden ser necesarios para constituir un sistema adecuado de control del agua. En este estudio, las zanjas abiertas se refieren a salidas para drenes de tubo o zanjas de campo más pequeñas. Los drenes abiertos se han distinguido de los drenes o parcelas, en que generalmente los primeros drenan áreas e involucran varias propiedades, mientras los drenes parcelarios drenan áreas más pequeñas en una sola propiedad.

La capacidad de una zanja abierta debe ser adecuada para eliminar el agua superficial y subsuperficial con una velocidad que no cause daño, tanto a los cultivos como a la zanja misma.

La capacidad de diseño de las zanjas abiertas está determinada por:

- La precipitación;
- El tamaño del área contribuyente;
- La topografía;
- Las características del suelo;
- La vegetación;

- La frecuencia y altura de las mareas y las aguas de inundación proveniente de ríos, arroyos, lagos y otras fuentes de agua.

Considerando los anteriores parámetros, el diseño apropiado de una zanja ha de incluir:

- Una velocidad de escurrimiento con un valor tal, que no se produzcan serios deslaves ni asolves,
- Suficiente capacidad para conducir el escurrimiento de diseño,
- Profundidad adecuada para drenar la tierra y,
- Taludes estables que no sufran socavaciones o deslizamientos hacia el interior de la zanja.

La localización de las zanjas abiertas requiere experiencia y buen criterio, combinadas con el estudio cuidadoso de las condiciones locales. Algunos de los factores importantes por considerar en la localización de las zanjas abiertas son los siguientes:

- a) Las zanjas se deben colocar a lo largo de los linderos de propiedad, principalmente, a conveniencia de los propietarios de los terrenos para tener acceso a sus tierras y poder tener los lotes o parcelas de tamaño y forma adecuados, para la eficiente operación de la maquinaria agrícola y distribución del cultivo.
- b) La localización de cauces naturales de desagüe y de las porciones bajas del terreno, generalmente, determinará la localización de la zanja, pues tal localización puede arrojar

menor cantidad de material de excavación y menor costo. con frecuencia es conveniente la rectificación del cauce antiguo.

3.2 Drenaje superficial

Los estudios descritos en el capítulo anterior, proporcionan la información necesaria para el diseño de un sistema de drenaje superficial. A continuación se mencionan algunos de los principios básicos para el estudio y solución a este problema.

Inicialmente es necesario diferenciar dos aspectos importantes en el diseño:

- a) El diseño de la red colectora principal y
- b) La determinación de la capacidad de las tierras para permitir el flujo del exceso de agua hacia los colectores.

En la actualidad, el diseño de la red colectora ha sido el más estudiado y de ello existen métodos suficientemente aceptables para la realización del diseño.

El segundo aspecto es más complicado puesto que depende del micro-relieve del terreno y hasta el momento no existe un método suficientemente probado para permitir un diseño racional. Actualmente, un método práctico para resolver este aspecto es modificando la topografía del terreno a fin de proporcionar pendientes que permitan una rápida evacuación del agua.

3.2.1 Parámetros para el diseño de la red colectora

3.2.1.1 Sistema hidrológico

En el diseño de drenaje superficial sólo se considera el exceso de agua en la superficie, no tomando en consideración el flujo subsuperficial y subterráneo, ya que el tiempo de retardo es muy largo y por lo tanto no tiene gran influencia en el dimensionamiento de la red.

Conociendo el comportamiento de la precipitación o exceso por riego, la variación de la evaporación e infiltración y el efecto regulador del sistema suelo-cobertura, se puede determinar la esorrentía, la cual es objeto de este estudio.

La mayoría de los métodos para calcular la esorrentía han sido diseñados para estimar las crecidas máximas (método de Cook, Hidrograma unitario, fórmula racional, etc.), sin embargo, en el drenaje superficial, lo importante es evacuar el exceso de agua en un tiempo razonable de acuerdo a la sensibilidad del cultivo, por lo que no es la crecida máxima lo que más interesa, sino la esorrentía total, pudiendo estar parte de la cuenca inundada por un período de tiempo hasta de algunas horas. Únicamente en el caso de algunas estructuras como alcantarillas, puentes, etc., es necesario el conocimiento de las crecidas máximas.

3.2.1.2 Precipitación de diseño

Para la obtención de la lluvia de diseño son considerados dos aspectos importantes:

- a) El período de retorno o frecuencia de la lluvia y

b) Su duración.

El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (SCS) recomienda una frecuencia de 5 a 10 años, mientras que la duración de la lluvia se escoge de acuerdo a la sensibilidad del cultivo y se denomina tiempo de drenaje.

Al tiempo de drenaje (Td) se le considera como el tiempo en horas que el cultivo puede permanecer, sin disminuir su rendimiento, bajo condiciones de inundación. Como no existe información disponible en nuestro medio, se adopta en general el siguiente criterio:

Hortalizas y cultivos delicados	6 - 8 horas
Cultivos anuales	12 - 24 horas
Pastos	48 - 72 horas

Si un cultivo permanece más allá de estos límites, éste inicia su proceso de marchitamiento y su consiguiente pérdida definitiva. A partir de estos límites, es necesario tomar algún tipo de medida para evacuar el excedente de agua.

3.2.1.3 Infiltración

Para la realización de un buen diseño de drenaje se requiere del conocimiento de la capacidad de absorción del suelo, por lo que es necesaria la determinación o estimación de su capacidad de infiltración.

En el drenaje superficial se considera que al momento de ocurrir la lluvia de diseño, el suelo se encuentra a capacidad de campo, por lo que la infiltración ha alcanzado un valor muy cercano a la infiltración básica. Se entiende por capacidad de campo como la máxima capacidad de retención de agua en condiciones de libre drenaje y se alcanza entre 24 y 72 horas después de haber concluido el riego.

3.2.1.4 Métodos para la determinación de la infiltración

- a) Anillos infiltrómetros: este método al utilizar un tiempo de 3 a 4 horas, proporciona valores cercanos a la infiltración básica. Consiste en dos cilindros concéntricos introducidos en el suelo en estudio; se le agrega constantemente agua en el centro y se toman las lecturas de profundidad y volumen del agua que se va filtrando. Las lecturas se hacen a los 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 y 240 minutos.
- b) Simuladores de lluvia: este método es aceptable, pero su equipo es costoso y su empleo mucho más difícil. Utiliza riego por aspersores y requiere condiciones óptimas como en el laboratorio.
- c) Para efecto de estudios preliminares existen cuadros donde se presentan algunos valores característicos de infiltración básica, pero debe tenerse en cuenta la reserva del caso.

3.2.1.5 Coeficiente de drenaje y ecuación de diseño

El coeficiente de drenaje (C_d) se define como el exceso de agua que debe removerse por unidad de tiempo, generalmente considerado como de 24 horas. Se expresa como una lámina por unidad de tiempo:

$$C_d = E/td \quad (3.1)$$

En donde:

C_d = Coeficiente de drenaje (L/T)

E = Escorrentía total (L)

T_d = tiempo de drenaje (T)

Al considerar el tiempo de drenaje en horas según la definición, para 24 horas C_d sería:

$$C_d = (E * 24) / td \quad (3.2)$$

En la cual el coeficiente de drenaje tendría unidades de lámina por 24 horas.

Al expresar el coeficiente de drenaje como un caudal por unidad de tiempo y área, normalmente en litros por segundo por hectárea (lps/ha) C_d podría obtenerse mediante una ecuación de la forma:

$$C_d = (K * E) / td \quad (3.3)$$

En donde Cd tiene unidades de litros por segundo por hectárea, E y td pueden tener cualquier unidad y K depende de las unidades E y td. Para E en milímetros y td en horas $K = 2.78$.

Si el área a drenar fuese muy pequeña, el caudal de diseño del colector se calcularía así:

$$Q = Cd * A \quad (3.4)$$

Para áreas menores de 5 Ha. ésta es una ecuación de diseño para los drenes colectores.

A medida que el área de la cuenca a drenar aumenta, el caudal producido por unidad de área, disminuye por efecto del almacenamiento y pérdidas en la red colectora y el tiempo de concentración. No existen en nuestro medio estudios que permitan determinar ese decrecimiento, sin embargo, el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), ha demostrado que esa disminución puede ser obtenida si en la ecuación de diseño se eleva el área a una potencia de 5/6, con lo cual el caudal de diseño puede ser obtenido mediante la fórmula:

$$Q = C \times A^{5/6} \quad (3.5)$$

En donde:

Q = Caudal de diseño (L^3/T)

A = Área (L^2)

C = coeficiente que depende del cultivo, precipitación y características de la cuenca (L)

Esta fórmula es llamada del “**Cipress Creek**” por McCrory (1915). Posteriormente fue modificada por Stephen y Mills (1965), de tal manera que pudiera ser utilizada en otras localidades, para lo cual propusieron una ecuación para calcular el coeficiente C de la fórmula original. La ecuación adaptada al sistema métrico decimal es:

$$C = 4.573 + 1.62 E \quad (3.6)$$

En la cual C es el coeficiente a utilizar en la ecuación (3.5) y E es la escorrentía total en centímetros.

3.2.1.6 Métodos para calcular la escorrentía total (E)

Esta puede ser determinada por dos métodos sencillos:

- a) El balance hídrico diario; y
- b) El método del Servicio de Conservación de Suelos, SCS.

En ambos métodos es necesario el conocimiento de:

- a) La lluvia de diseño;
- b) La capacidad de infiltración de los suelos.

Esta lluvia de diseño se obtiene de acuerdo a:

- a.1. Período de retorno: que obedece más a factores económicos que técnicos y que, como ya se indicó anteriormente, se considera entre 5 y 10 años;

- a.2. Duración de la lluvia: determinada de acuerdo al cultivo y la cual se considera igual al tiempo de drenaje (td);
- b. Capacidad de infiltración de los suelos, ésta puede ser medida o estimada. Debido a los muchos factores que influyen sobre esta variable, se tiene que tener mucho cuidado para su determinación.

3.2.1.7 Método de balance hídrico.

Este método no es más que la aplicación de una ecuación sencilla de balance hídrico:

$$E = P - I - Et \quad (3.7)$$

En la cual E es la escorrentía total, P es la lluvia de diseño, I es la infiltración durante el mismo tiempo y Et es la evapotranspiración durante el tiempo de drenaje (td). Es común no incluir la evapotranspiración, ya que ésta se reduce a unos cuantos milímetros; en este caso la ecuación se reduce a:

$$E = P - I \quad (3.8)$$

3.2.1.8 Método del Servicio de Conservación de Suelos

Este método fue desarrollado en forma experimental, utilizando datos de un gran número de pequeñas cuencas. En él se estima la escorrentía total a partir de datos de precipitación y otros parámetros de las cuencas de drenaje. Se basa en la relación:

$$F/S = Q/Pe \quad (3.9)$$

En donde:

F = infiltración real acumulada (L)

S = infiltración potencial (L)

Q = escorrentía total acumulada (L)

Pe = escorrentía potencial o exceso de precipitación (L)

Esta ecuación se considera válida a partir del inicio de la escorrentía. Pe se define como:

$$Pe = P - La \quad (3.10)$$

Donde el término *La* es llamado de sustracciones iniciales y está definido como la precipitación acumulada hasta el inicio de la escorrentía y es una función de la interceptación, almacenamiento en las depresiones e infiltración antes del comienzo de la escorrentía.

F está definida como:

$$F = Pe - W \quad (3.11)$$

Combinando las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11) se tiene

$$Q = \frac{(Pe)^2}{Pe + S} \quad (3.12)$$

Los autores del método obtuvieron una relación entre La y S igual a 0.2; esto quiere decir que $La = 0.2S$, siendo esta relación lo suficientemente aceptable para situaciones promedio. Al ser reemplazada esta relación en la ecuación (3.12) se tiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{Pe + S} \quad (3.13)$$

La cual es la ecuación principal del método. Existe una forma gráfica de resolver esta ecuación, figura 2 que será analizada más adelante.

Para poder aplicar la ecuación es necesario conocer el valor de la infiltración potencial S que está en función del suelo, las condiciones de la superficie del terreno y la humedad inicial, El valor de S para una determinada condición puede ser obtenido mediante el análisis de hidrogramas de cuencas homogéneas. Al despejar S de la ecuación se tiene;

$$S = \frac{(Pe)^2}{Q} - Pe \quad (3.14)$$

Todos los valores en la ecuación (3.12) pueden ser obtenidos de un hidrograma y su correspondiente histograma.

Luego de estudiar un gran número de cuencas, el SCS realizó un cuadro para estimar S a partir de un cierto valor denominado número de curva CN, del que S está relacionado mediante la ecuación:

$$S = \frac{2540}{CN} - 25.4 \quad (3.15)$$

Donde el valor del CN indica la permeabilidad relativa.

El cuadro (1) se utiliza para obtener los valores CN para diferentes condiciones hidrológicas y prácticas agrícolas. Fue elaborado para una relación $La = 0.2S$ y para una condición de humedad antecedente promedio (AWC II). Para definir esta condición de humedad se utilizan los siguientes valores:

CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE	PRECIPITACIÓN ACUMULADA DE LOS 5 DÍAS PREVIOS AL EVENTO EN CONSIDERACIÓN.
GRUPO	
I	0 - 3.30 cm
II	3.5 - 5.25 cm
III	más de 5.25 cm

Los grupos pueden ser obtenidos a partir de la información de un estudio de suelos utilizando la clasificación hidrológica de los suelos del SCS resumidos en el apéndice A, así como del potencial de escorrentía en función de la clase de la tierra indicada en el apéndice B.

La condición hidrológica que aparece en el cuadro (1) se refiere en forma general al grado de cobertura vegetal y puede compensarse de la siguiente forma:

BUENA	=	Cobertura en más del 75% del área a drenar.
REGULAR	=	Cobertura entre el 50% y el 75% del área a drenar.
MALA	=	menos del 50% del área a drenar.

3.2.2 Métodos de drenaje superficial

Los métodos de drenaje superficial para una determinada área dependerán de varios factores de los cuales los más importantes son:

- a) Fuente de exceso de agua;
- b) Características topográficas del área;
- c) Suelos;
- d) Cultivos a utilizar;
- e) Consideraciones sociales

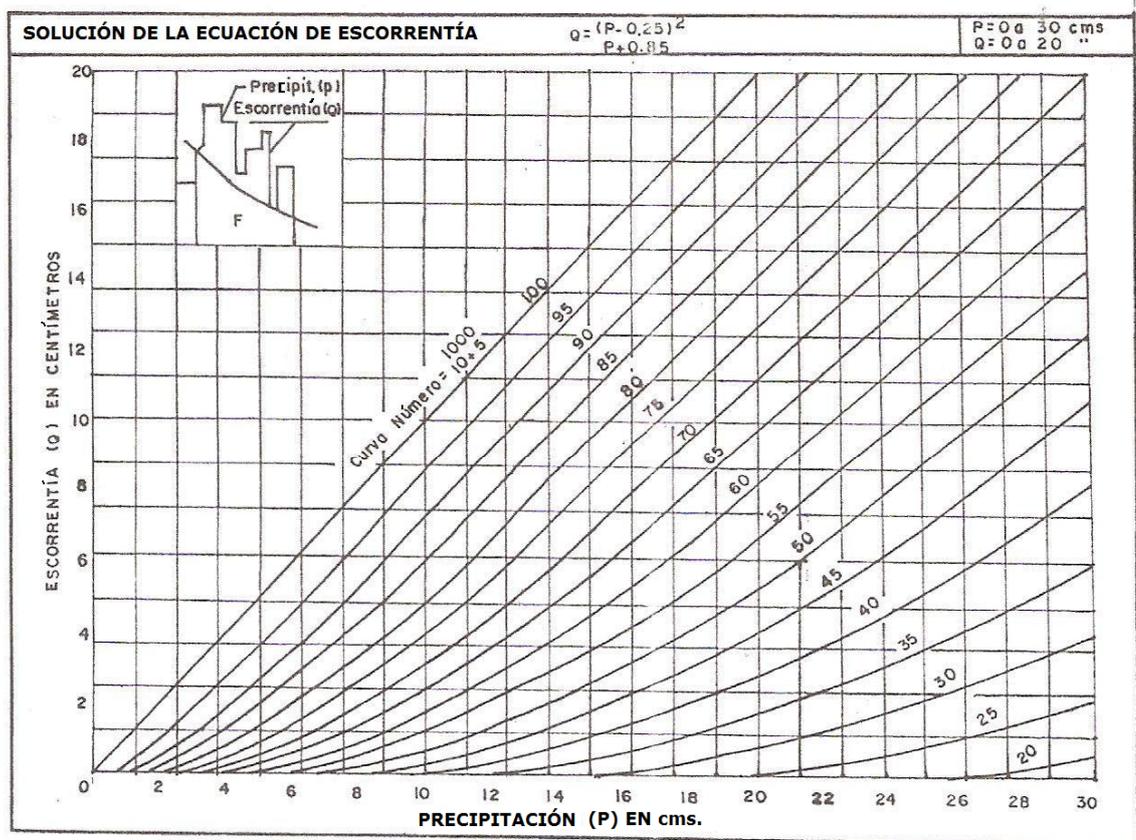
Dependiendo de la fuente de exceso de agua, pueden encontrarse tres tipos de solución:

- Control de inundaciones,
- Control de la escorrentía de las zonas adyacentes,
- Drenaje superficial local.

Cuadro 1. Curvas de escorrentía para los complejos Suelo-Cobertura (CN) para ser utilizada en la figura (para condiciones de humedad IT y $La = 0.2$)

COBERTURA			Grupo de Suelos			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
Restrojo cultivos en hilera	Hileras rectas	-----	77	88	91	94
	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras rectas	Buena	67	78	86	89
	C/curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
	C/curvas de nivel	Buena	65	75	82	88
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
	Curvas de nivel y terrazas	Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
	Hileras rectas	Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
	Curvas de nivel y terrazas	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	86	89
	Hileras rectas	Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
	Curvas de nivel	Buena	66	69	78	83
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83
	Curvas de nivel y terrazas	Buena	61	67	76	80
Pastos de pastoreo	Hileras rectas	Mala	68	79	86	89
	Hileras rectas	Regular	49	69	79	84
	Hileras rectas	Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	06	36	70	78
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	78
		Buena	25	55	70	77
Pacios, caminos tierra o pavimentos		-----	59	74	82	86
		-----	72	82	87	88
		-----	74	84	90	92

Figura 2. Solución de la ecuación para el cálculo de la escorrentía



FUENTE: SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS DEL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DEL GOBIERNO DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

3.2.2.1 Control de inundaciones

Consiste en construir obras de ingeniería que impidan el desbordamiento de los ríos causantes del problema, la principal desventaja de este método, es que este tipo de obras requieren de una gran inversión, así como un estudio hidrológico bastante profundo. Algunas de estas obras son: presas, diques, etc.

3.2.2.2 Control de la escorrentía de áreas adyacentes

El control de la escorrentía se logra por medio de canales interceptores o bien mediante la protección del área con diques perimetrales. Una combinación de ambos métodos permite mejores resultados. Ver figura 3.

3.2.2.3 Drenaje superficial local

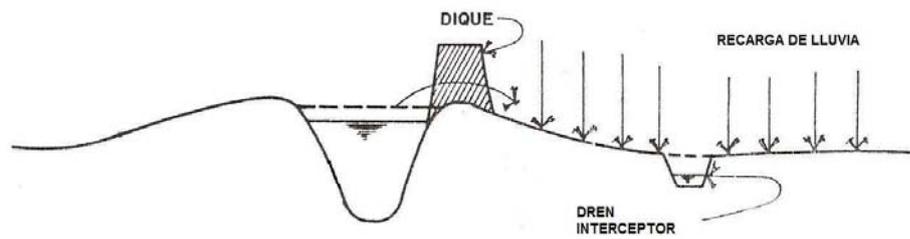
Lo conforma el conjunto de canales de desagüe así como las obras de sistematización del terreno que se realizan en el área del problema.

La red de drenaje comprende:

- Canales principales,
- Canales secundarios,
- Canales colectores.

Los canales principales pueden ser los mismos drenajes naturales o canales existentes, que en ambos casos son ampliados y rectificadas. Los canales secundarios son construidos para ampliar la red y éstos los conforma parte de la red natural así como canales nuevos. Los colectores o terciarios son los canales que recogen el agua directamente de las parcelas inundadas.

Figura 3. Control de escorrentía de las áreas adyacentes



La red principal del drenaje debe diseñarse bajo el supuesto que el escurrimiento superficial sobre las parcelas será logrado en los tiempos previstos, la red colectora se diseña siguiendo las normas hidráulicas conocidas y su funcionamiento se supone de acuerdo a lo diseñado. En el caso del escurrimiento de las parcelas hacia la red colectora, no se puede determinar con tanta facilidad debido a las condiciones naturales, es decir, que en éstas se encuentran irregularidades propias de un terreno agrícola.

El flujo de agua en exceso que fluirá a los drenes colectores dependerá de:

- a) Pendiente del terreno;
- b) Micro-relieve;
- c) Cobertura;
- d) Condiciones de humedad;
- e) Longitud de recorrido del flujo.

La mayor o menor velocidad desarrollada por el flujo dentro de los canales depende directamente de estos factores: la pendiente, el micro-relieve y la longitud del recorrido pueden planificarse mediante obras de conformación del terreno.

3.2.2.4 Métodos de conformación del terreno

Cuando no ocurre un flujo suficientemente rápido para garantizar el escurrimiento y evacuación de los excesos de agua en el tiempo requeridos por el cultivo, debe modificarse la superficie del terreno. Esto se logra mediante la sistematización y conformación del terreno.

Para asegurar la evacuación de los excesos de agua, debe modificarse, si es necesario, cualquiera o en forma combinada los factores: pendiente,

micro-relieve o longitud de recorrido. La pendiente puede modificarse por medio de obras de conformación del terreno, lo que se detallará más adelante. El micro-relieve, por su lado, se modifica alisando la superficie, mientras que la longitud de recorrido se modifica por medio del espaciamiento de los canales colectores parcelarios. Ver figura 4.

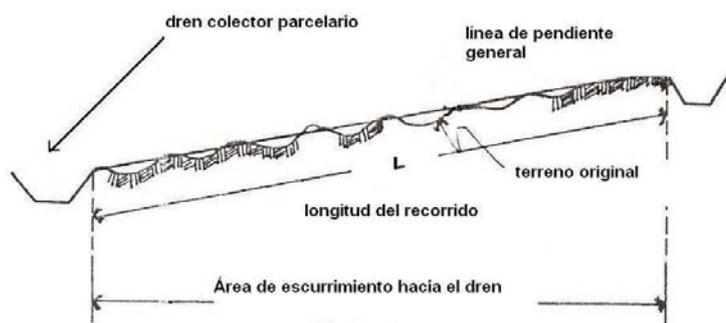
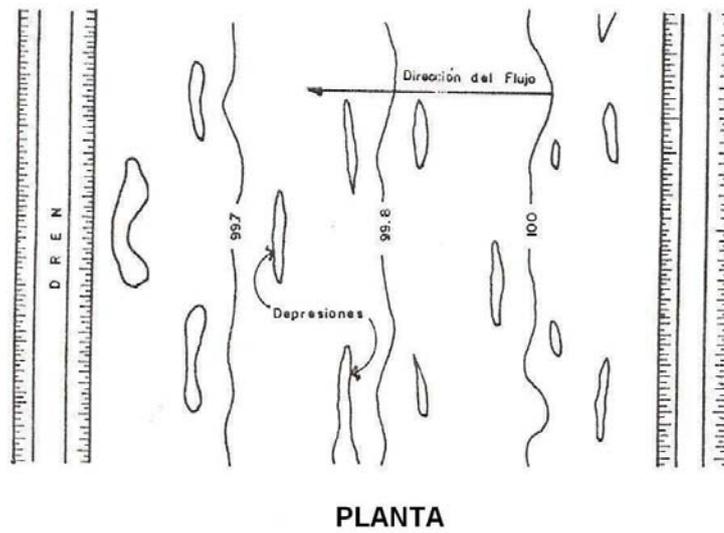
La cobertura se modifica simplemente cambiando el cultivo o uso de la tierra, no así las condiciones de humedad, pues ésta depende del clima de la región. Los métodos más conocidos para mejorar el drenaje superficial son;

- a) Conformación;
- b) Emparejamiento o alisamiento;
- c) Camellones anchos o bancales;
- d) Camellones angostos.

a) Conformación: puede hacerse para aumentar las pendientes en tierras muy planas o bien para alterar topografías consideradas muy irregulares, conformándolas en varios planos que permitan el libre escurrimiento. Generalmente, se utiliza este método cuando se contempla el riego complementario por superficie. En un trabajo de este tipo, se modifican todos los factores principales como: pendiente, micro-relieve y longitud de recorrido, tal y como se mencionó anteriormente.

La gran desventaja de este método radica en el costo, ya que es muy elevado y además, si no se planifican correctamente los cambios inducidos en las pendientes del terreno, pueden resultar contraproducentes en los períodos secos, por falta de agua para los cultivos; por otro lado, al exagerarse la pendiente, provoca erosión de suelos. Las obras de conformación por lo general requieren del uso de

Figura 4. Factores topográficos modificables mediante obras de conformación del terreno



maquinaria pesada, la cual puede causar gran perturbación de la naturaleza de los suelos, por lo tanto, el uso de este método debe condicionarse de tal forma que se produzca una mínima alteración y remoción del suelo vegetal, por lo que no se recomienda el método para suelos poco profundos. Las figuras 5 y 6 muestran esquemas de la utilización del método.

b) Alisamiento o emparejamiento: consiste en la eliminación de pequeñas depresiones y montículos que impiden el movimiento del agua. Su uso se recomienda generalmente en terrenos que poseen una pendiente adecuada, por lo que no se contempla la modificación de la pendiente y consecuentemente, el movimiento de tierra es bastante pequeño. Una de las desventajas de este método radica en que los canales colectores se trazan de tal forma que éstos comuniquen todas las áreas de cotas bajas. Esto provoca una distribución de drenes y parcelas muy irregulares, ver figura 7.

c) Camellones anchos o bancales: consiste en conformar la tierra a modo de crear una superficie cóncavo-convexa que permita el rápido movimiento del agua en exceso. En la parte cóncava se hacen los drenes mientras que en la parte convexa se plantan los cultivos.

Pueden construirse utilizando un simple arado, el cual se pasa sucesivamente sobre el terreno empujando la tierra hacia el centro del bancale o, bien, con maquinaria para movimiento de tierra. Entre las desventajas de este método se encuentra la mecanización ya que las labores agrícolas deben realizarse siempre en el sentido longitudinal. Además, cuando se requiere regar, existe la dificultad de hacerlo con

Figura 5. Conformación (*Land Grading*) para aumentar la pendiente del terreno

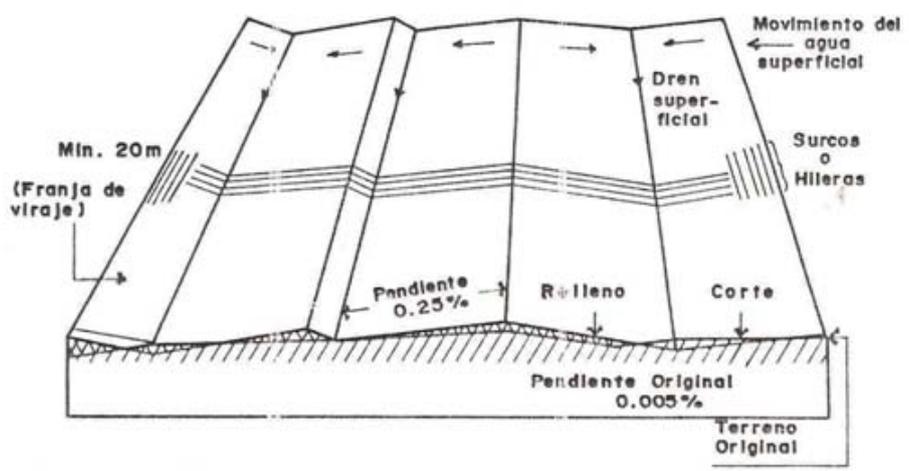


Figura 6. Conformación

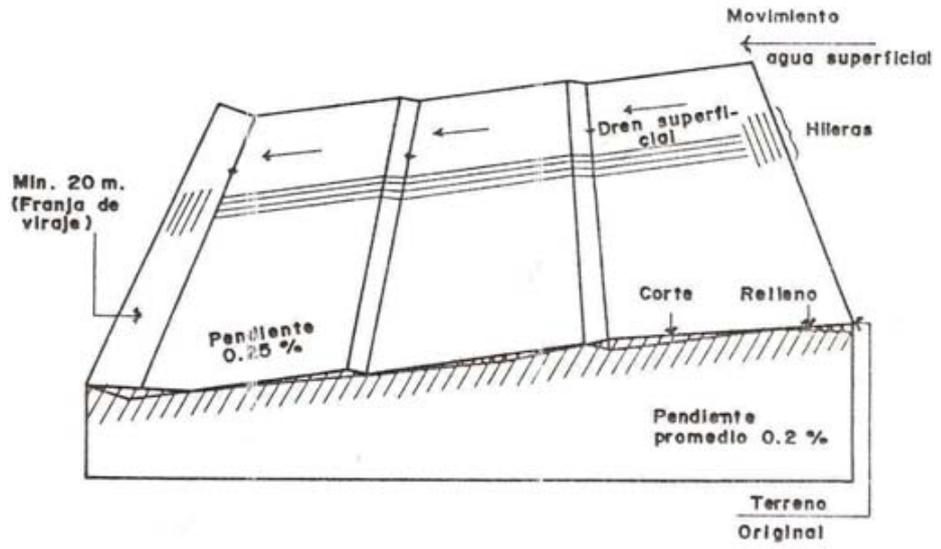


Figura 7. Emparejamiento (*Land Smoothing*) con drenes al azar

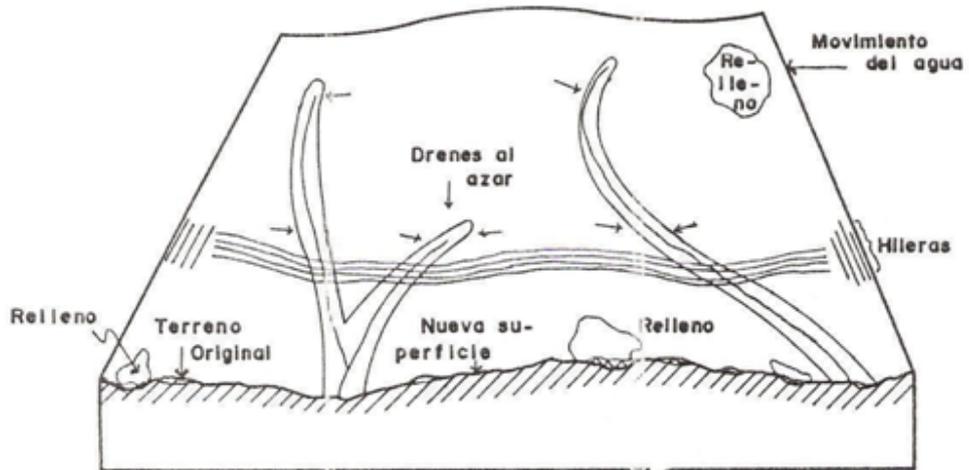
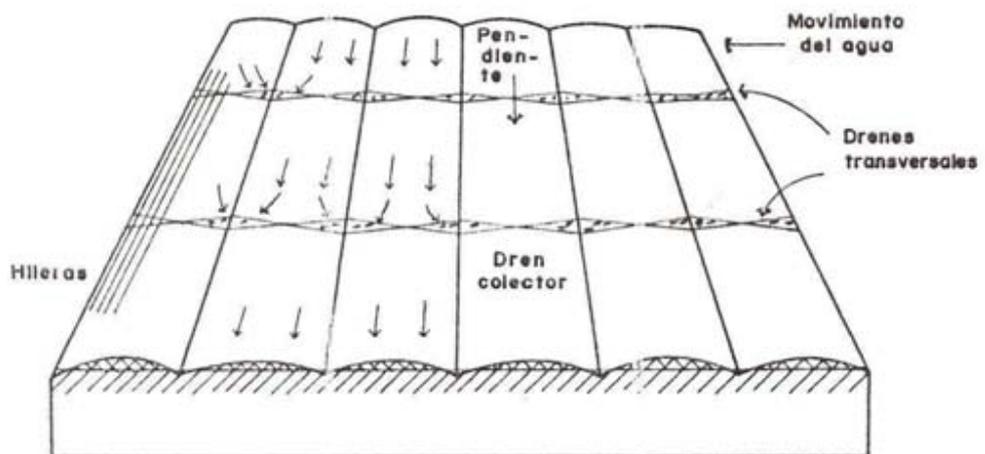


Figura 8. Camellones anchos (*Bedding*)



riego superficial. El ancho y la pendiente laterales de los camellones deben diseñarse de tal forma que éste funcione eficientemente en períodos secos y húmedos. Las figuras 8, 9 y 10 muestran detalles del método.

d) Camellones angostos: este método es el más sencillo y económico para mejorar el drenaje superficial. Consiste en la simple construcción de surcos que servirán como drenes y en el camellón provocado se plantan cultivos. Al igual que en los anteriores métodos, el diseño de las dimensiones y pendientes de los camellones deben permitir una rápida evacuación de los excesos de agua producto de las inundaciones o exceso de riego, pero, al mismo tiempo, no tan altos ni con pendientes excesivas que provoquen un desequilibrio en las propiedades hídricas del suelo así como erosión. Una esquematización del método se aprecia en la figura 11.

3.3 Drenaje subsuperficial o drenaje interno

Un sistema de agua subsuperficial reacciona a los diversos factores de recarga y descarga de dos formas: probabilístico o determinístico.

Un sistema probabilístico suministra valores esperados dentro de las limitaciones de los términos de probabilidad que define su comportamiento. Puesto que la precipitación normalmente sucede en forma aleatoria, la recarga del agua subsuperficial por precipitación o riego sucede también en forma aleatoria con una distribución de probabilidad asociada.

Un sistema determinístico se define por razones causa-efecto definidas. Esto significa que su función es prevenir los efectos que surgirán de las causas. Por

ejemplo, una causa puede ser la aplicación del riego y su distribución y el efecto está relacionado con los cambios producidos en la napa freática. Por consiguiente, para una cantidad de agua de riego suministrada, puede medirse el cambio inducido en el cambio de agua.

Sin embargo, en la práctica, los sistemas de agua superficial se tratan normalmente como sistemas determinísticos. Las investigaciones de drenaje agrícola se centran en la investigación de las condiciones de la capa de agua, sin embargo, tal reconocimiento no consiste simplemente en medir la profundidad de la capa de agua, sino en la situación actual, extensión y grado del problema.

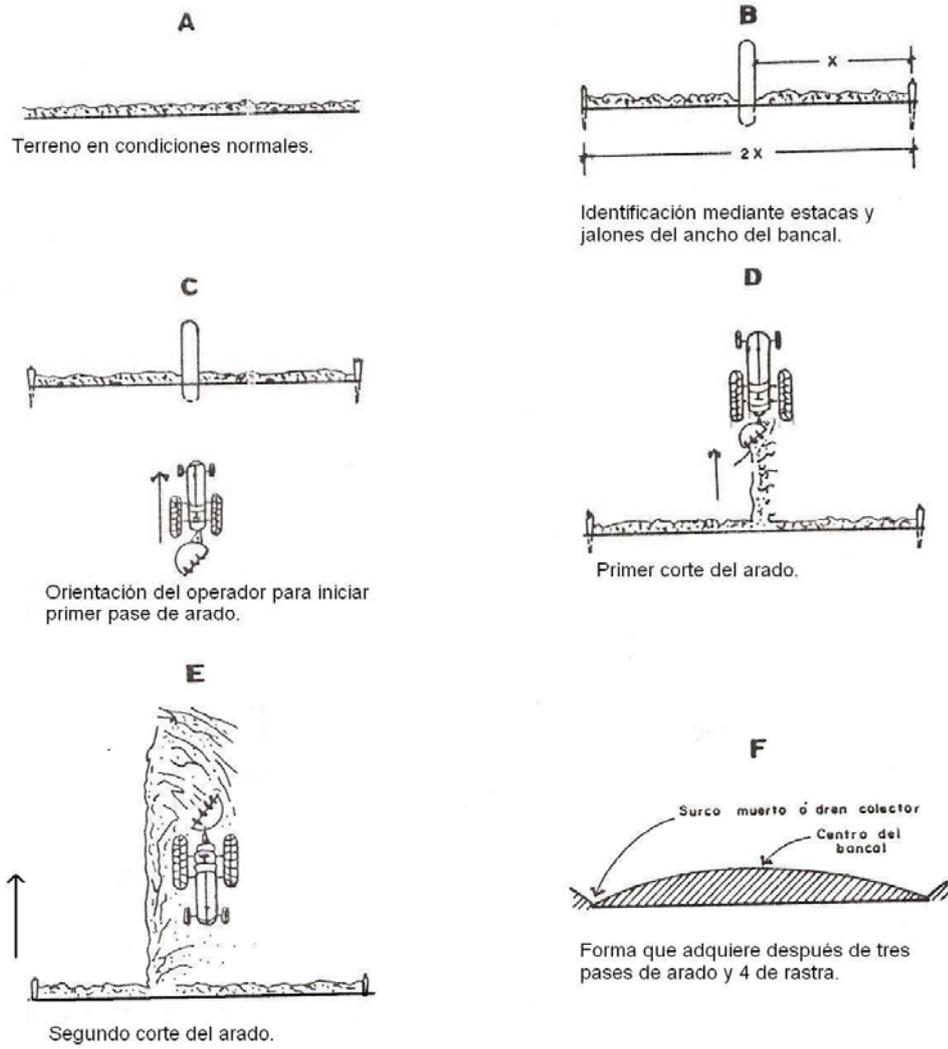
Los objetivos principales de una investigación de las condiciones de agua superficial que forma parte de un estudio agrícola, se definen como:

- Determinación del grado, extensión y naturaleza de los problemas de drenaje existentes o potenciales,
- Análisis del sistema de agua superficial, así como la estimación del balance de agua que permita comprender la causa del problema,
- Indicar cómo un sistema de agua puede ser alterado artificialmente, sin que la capa de agua afecte el desarrollo de los cultivos.

3.3.1 Estudio preparatorio

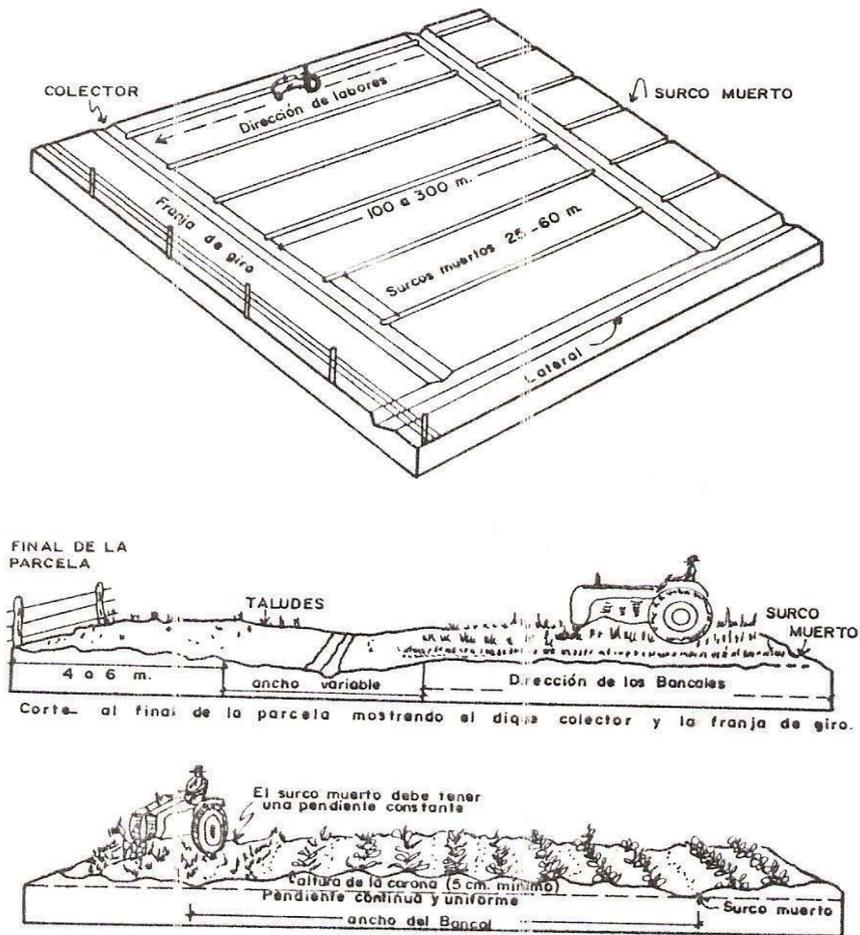
La investigación de las condiciones del agua superficial debe ser una fase preparatoria que incluye:

Figura 9. Secuencia a seguir para la construcción de un camellón ancho*



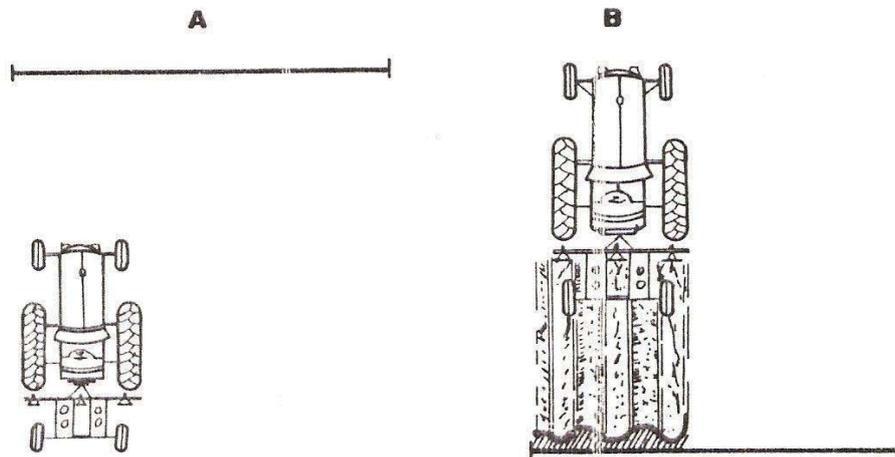
* Tomado de Marcaro (1975).

Figura 10. Algunos detalles de los bancales



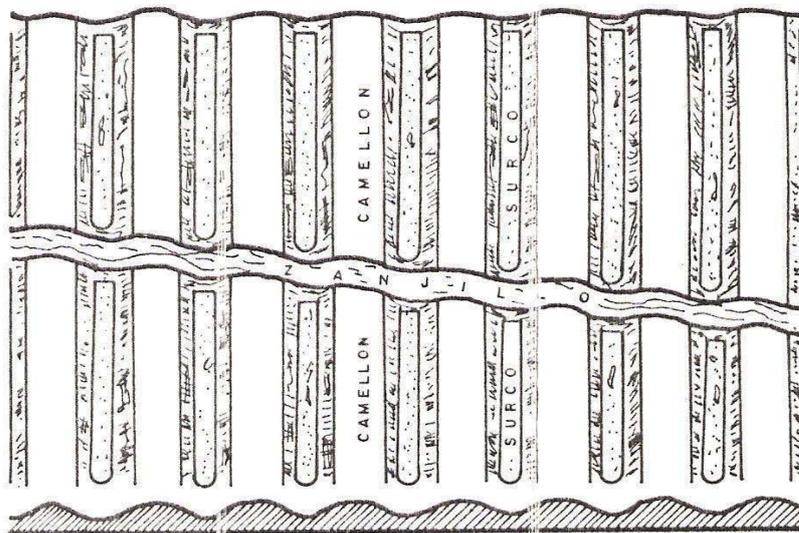
(Tomado de SCS. Drainage of agricultural Lands, 1971).

Figura 11. Sistema de siembra en camellones más zanjillos



Orientación del tractor y demás implementos para iniciar las labores de acamellonado, siembra y abonado.

inicio de las labores de acamellonado, siembra y abonado.



Vista general de los camellones más zanjillos.

3.3.1.1 Mapas topográficos

Deben obtenerse mapas topográficos a escalas grandes: 1/10,000, 1/20,000, 1/50,000 y éstos servirán como la base esencial donde se obtendrá información y se plantearán resultados. Es recomendable transferir información específica a estos mapas ya que ello facilitará los estudios de gabinete.

3.3.1.2 Mapas geológicos

Estos mapas permiten distinguir zonas permeables y menos permeables, así como delimitar zonas de recarga, transmisión y descarga, definir los tipos de acuíferos (libres, confinados, semi-confinados, etc.).

3.3.1.3 Datos hidrológicos

Debe obtenerse toda la información disponible tanto en oficinas públicas como privadas.

3.3.1.4 Calidad del agua

Debe investigarse la calidad del agua, ya que en muchos casos los problemas de drenaje agrícola se asocian a problemas de salinidad del agua subsuperficial.

3.3.1.5 Investigaciones de orientación

Esto implica señalar la ubicación de todos los pozos superficiales y profundos existentes en el área de estudio. Posteriormente, deberá hacerse una comprobación de campo en la que se agreguen todos aquellos pozos no

catastrados. Si además se conoce información de calidad del agua, ésta debe ser indicada en los mapas topográficos.

3.3.2 Investigación del nivel del agua subsuperficial

Con base en el trabajo preliminar, el siguiente paso es la determinación y grado del problema de drenaje. Éste debe iniciarse observando la napa freática.

La tierra agrícola que va a recuperarse normalmente está constituida de una capa de textura fina cuyo espesor varía de pocos centímetros a varios metros. En la investigación de los niveles de agua subsuperficial se hacen observaciones por medio de:

- Pozos existentes;
- Sondeos abiertos;
- Piezómetros;
- Aguas superficiales.

3.3.2.1 Pozos existentes

Éstos ofrecen la posibilidad de obtener información del nivel de agua subterránea y en la mayoría de los pueblos, granjas, etc., se encuentran uno o más de estos pozos, tienen el inconveniente que su emplazamiento no siempre se ajusta a la red deseada, pero es muy útil incluirlos en la red planificada, ya que es un medio económico de obtener información.

Si el pozo ha sido excavado a mano se puede estar completamente seguro de que el nivel del agua corresponde verdaderamente a la capa de agua. Su profundidad normalmente es de un metro por debajo de la capa de agua más baja. Poseen un diámetro grande y en ello radica su gran capacidad de almacenamiento, lo cual requiere de un tiempo considerable para que el nivel de agua en el pozo se adapte a los cambios de la capa de agua, o se recupere cuando el agua extraída sea en grandes proporciones, principalmente si la conductividad hidráulica del acuífero es baja. Si las lecturas en el pozo son tomadas poco después de ser rebajado su nivel, éstas son válidas.

Cuando el pozo existente ha sido perforado normalmente tiene una profundidad mayor que uno excavado a mano, pueden penetrar varios acuíferos separados entre ellos por capas de arcilla.

Estos pozos están provistos de un revestimiento en el que una tubería o filtro se adapta a las diversas profundidades donde aparecen acuíferos. En algunos casos, el revestimiento va desde la superficie hasta el fondo. En estos pozos el nivel de agua no representa exactamente la napa freática sino una composición de las diversas cargas hidráulicas existentes en los acuíferos. Las observaciones realizadas en pozos de estas condiciones no son necesariamente válidas. Debe recogerse información sobre su profundidad, tipo de capas penetradas, revestimiento y filtro; es hasta este momento cuando es posible concluir si el pozo penetra un acuífero libre, en cuyo caso la información sobre la napa freática sería válida o un acuífero semi-confinado o un sistema de acuífero múltiple, en este caso la información sobre la napa freática no sería válida.

3.3.2.2 Sondeos abiertos

Estos sondeos pueden ser hechos fácilmente con un barrenador manual con un diámetro de 2 a 3 pulgadas. Los sondeos deben ser hechos unos pocos centímetros por debajo de la profundidad de la capa de agua más baja. Deben ser referenciados a un punto fijo difícilmente destructible (monumento) y las lecturas de la capa de agua se toman desde este punto, en el que deben ser medidos con equipo topográfico, su elevación absoluta y su elevación con respecto a la superficie del terreno. Es conveniente establecer un sistema de mojones que permitan una mayor precisión en el trabajo.

Los sondeos abiertos representan una forma económica de medir las profundidades de la capa de agua, sin embargo, existen algunas desventajas en su uso tales como fácil destrucción por vandalismo, lo que implica tener que ocultarse a la vista; son fácilmente derrumbables y no es posible profundizar mucho por debajo de la capa de agua, debido al movimiento de arenas finas. En estas circunstancias, se recomienda el uso de revestimiento y empleo de un extractor de arena.

3.3.2.3 Piezómetros

Consisten en tubos abiertos en sus extremos, introducidos en el terreno hasta una profundidad en la que se desea determinar la carga hidráulica. El nivel de agua en el tubo corresponde a la carga hidráulica en el extremo inferior del mismo.

Debe tenerse en cuenta que cuando se utilizan piezómetros en un acuífero libre, los componentes del flujo vertical son de tan poca importancia que pueden despreciarse. Esto implica que a cualquier profundidad en un acuífero

libre, la carga hidráulica corresponde a la altura del nivel freático sin importar a qué profundidad ha penetrado el piezómetro en el acuífero.

En un acuífero semi-confinado el flujo del agua subsuperficial es esencialmente horizontal y las componentes del flujo vertical pueden ser despreciadas. La distribución de la carga en este acuífero es la misma en cualquier lugar de un plano vertical. La profundidad de penetración del piezómetro en un acuífero semi-confinado es de poca importancia, pero se recomienda que su extremo no debe ser colocado demasiado cerca de la capa de arcilla tanto inferior como superior a causa de los posibles efectos de las filtraciones. Ver figura 12.

Cuando la capa de agua desciende debido a los cambios normales durante el transcurso del año, el piezómetro quedará seco, por consiguiente, con fines prácticos, los piezómetros se colocan algo más profundo que la capa de agua más baja esperada. Para mantener la tubería en posición y evitar además cualquier contacto directo entre el agua superficial y el material de relleno (arena, arena arcillosa fina, etc.) entre el espacio anular debe hacerse un cierre de concreto alrededor del tubo, desde la superficie del suelo hasta una profundidad adecuada de algunos centímetros. Al extremo del tubo se le coloca un tapón con un pequeño agujero que permita la salida del aire. Ver figura 13.

3.3.2.4 Agua superficial

Esto incluye ríos, lagos, manantiales, canales, etc. Si se desprecian los niveles de agua superficial que están al libre contacto con la napa freática se estaría haciendo una investigación de las condiciones del agua subsuperficial.

Cuando un arroyo es alimentado por el agua subterránea se le denomina como “arroyo efluente”, mientras que si el arroyo alimenta a la napa freática se le denomina como “arroyo afluente”, ya que actúa como un canal de recarga. Ver figura 14.

En estas condiciones es conveniente instalar un buen número de estaciones de control y medir su elevación absoluta. Si la napa freática está por debajo del fondo del arroyo, el nivel de agua del mismo no representa ningún punto del nivel freático, en cuyo caso el arroyo estará perdiendo agua que percola a través de la zona no saturada a la napa freática profunda. En este caso no es necesario colocar una estación de control en el canal, pero se recomienda instalar un piezómetro en los márgenes.

3.3.3 Red de observación

Los datos suministrados por una red de puntos de observación tales como: elevación y variación de la napa freática, así como de la superficie piezométrica, mejor llamada potenciométrica, pueden ser utilizados para la determinación de:

- La configuración de la napa freática y de la superficie potenciométrica;
- La dirección del movimiento del agua subsuperficial;
- El emplazamiento de las zonas de recarga y descarga.

Los puntos de observación deben responder a una buena planificación de la distribución; un número excesivo de puntos o muy reducido no son recomendables ya que lo que debe buscarse es una adecuada distribución. Ésta

debe basarse en la información topográfica, geológica, hidrológica, de suelos, etc., estudiada y analizada en la fase preparatoria.

Los puntos de observación deberán ser colocados:

- A lo largo, en forma perpendicular a las líneas de flujo del agua;
- En zonas donde se considere que existirán cambios significativos en el nivel freático;
- En los lugares que se crean existirán cambios de pendiente en la superficie potenciométrica;
- En los márgenes de los ríos, lagos, canales, etc., y a lo largo de líneas perpendiculares a ellos, con el objeto de determinar la curvatura de la napa freática cerca de estos cursos de agua;
- en zonas donde existan o pueda existir napas freáticas superficiales. Tal el caso de las zonas sometidas a riego intenso o en zonas de filtración.

La distribución de la red de observación debe extenderse un poco más allá de la zona de estudio para poder determinar cualitativamente y cuantitativamente cualquier flujo de entrada o salida desde o hacia zonas adyacentes. La densidad de la red de observación depende totalmente de las condiciones topográficas, geológicas e hidrológicas del área en estudio así como del tipo de investigación.

Como una guía aproximada, a continuación se presenta un cuadro que responde en general a una precisión inversamente proporcional al tamaño de la superficie.

Figura 12. Secciones esquemáticas de un acuífero libre (A) semiconfinado (B).

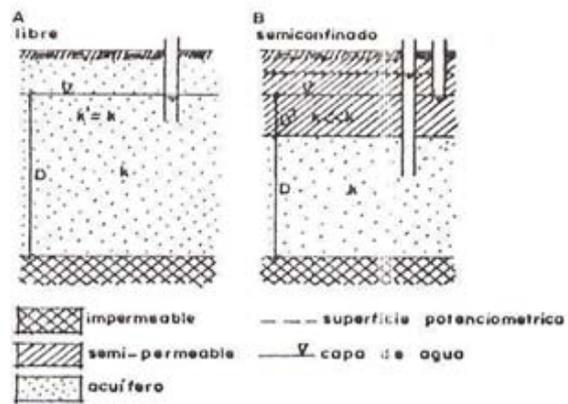


Figura 13. Sección transversal esquemática de un piezómetro

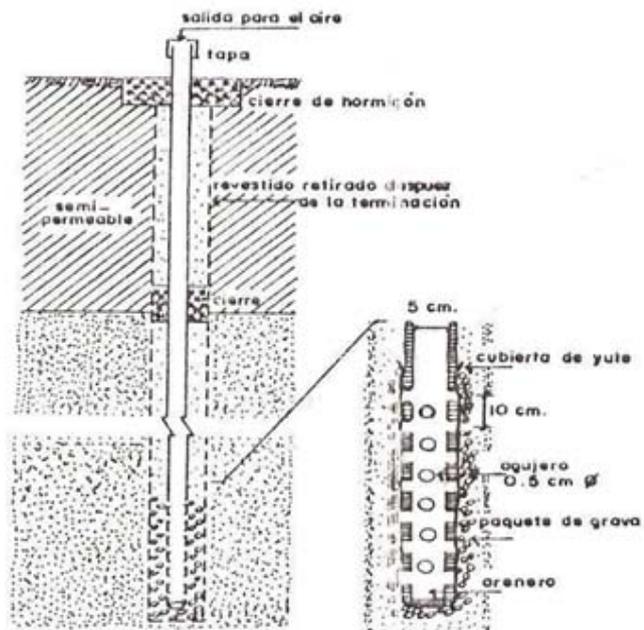


Figura 14. Arroyos efluentes (que ganan) e influentes (que pierden).

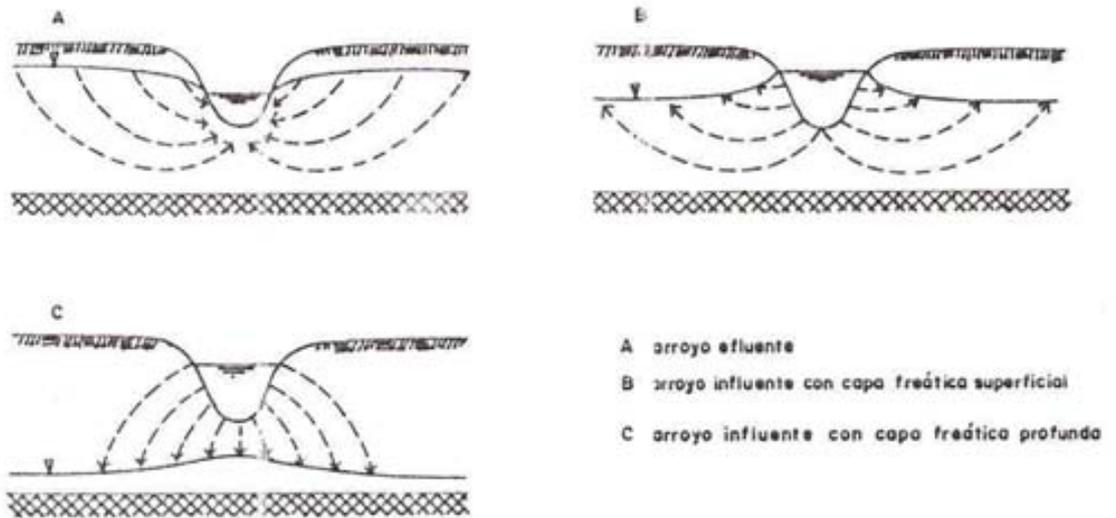
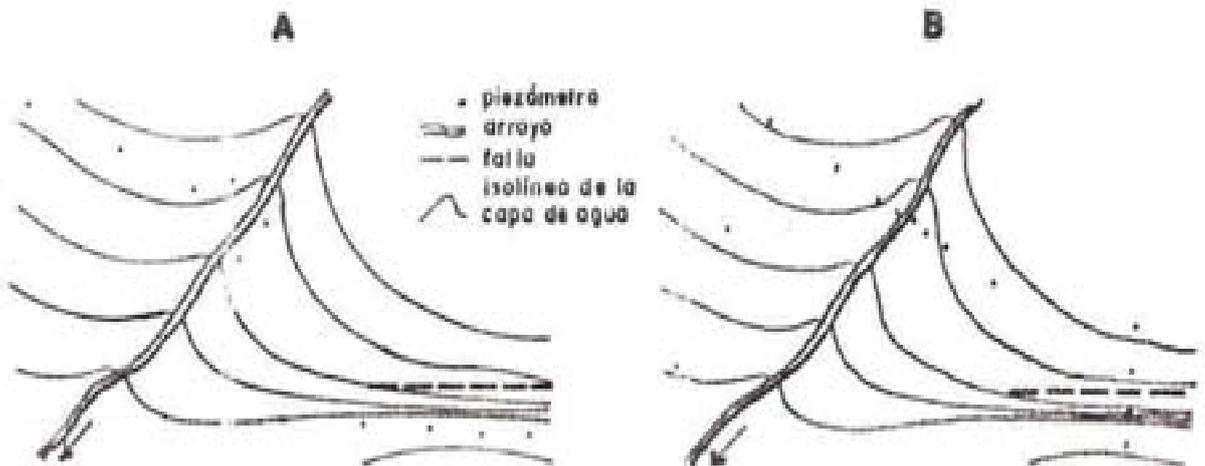


Figura 15. Distribución de una red piezométrica para algunas condiciones esperadas de la capa de agua subsuperficial: A= Incorrecta B= Correcta.



TAMAÑO DE LA ZONA EN ESTUDIO (Ha)	NÚMERO DE PUNTOS DE OBSERVACIÓN POR CADA 100 (Ha)	NÚMERO DE PUNTOS DE OBSERVACIÓN
100	20	20
1000	40	4
10,000	100	1
100,000	300	0.3

Un ejemplo de cómo debe distribuirse una red de puntos de observación, se observa en la figura 15.

3.3.4 Lecturas del nivel de agua

Deben tomarse siempre desde un punto de referencia de altura conocida absoluta y relativa, es decir, referenciado por encima o por debajo de la superficie del terreno y por encima y por debajo del nivel medio del mar. Cualquier dato del nivel del agua freática se convierte entonces en:

- Profundidad por debajo de la superficie del terreno;
- Elevación absoluta sobre o bajo el nivel del mar.

La precisión de las lecturas del nivel del agua dependen en gran parte de:

- El equipo empleado y su método;
- La frecuencia de las medidas.

3.3.4.1 Métodos y equipos

- a) Método de la cinta: dentro del tubo del pozo o sondeo se desliza una cadena o cinta, de acero, calibrada, a la que se le sujeta un peso, se anota la longitud que ha sido bajada la cadena desde el punto de referencia y luego se mide la longitud de la parte húmeda. Restando la longitud húmeda de la longitud total introducida, se obtiene la profundidad del nivel del agua por debajo del punto de referencia.

- b) Método del indicador eléctrico: este método consiste en un cable eléctrico con dos electrodos en el extremo inferior. En el extremo superior se conecta a una batería junto a un indicador como lámpara, amperímetro, etc. Al bajar el cable a través del tubo, se cierra el circuito con el primer contacto de agua, el cual es indicado por el dispositivo. Luego se procede a leer la profundidad si el cable no está calibrado.

- c) Método del sonador mecánico: se compone de un pedazo de tubo o similar de acero o cobre, de un diámetro de 0.5 a 1 pulgada (12.7 a 25.4 mm) y longitud de 2 a 3 pulgadas (50.8 a 76.2 mm), el cual se cierra en su extremo superior. Éste se conecta a una cinta de acero calibrada o una cadena. Al bajar el sonador produce un sonido característico cuando entra en contacto con el agua. De igual forma se procede a tomar la lectura directamente en la cinta calibrada, a lo largo de la cadena.

- d) Método del indicador de nivel flotante o registrador: consiste en un flotador y un contrapeso unido al indicador o registrador, los cuales se pueden ajustar a diferentes longitudes del período de observación. Un inconveniente es el uso de tubos de mayor diámetro. Existen en la

actualidad registradores que perforan de acuerdo con un código el nivel del agua en una cinta de papel. Los equipos más modernos poseen una conexión directa a un computador que procesa directamente la información. Otros registradores están equipados con un transmisor de radio que a un tiempo determinado da señales automáticas del nivel de agua a un puesto receptor. Estos se aprecian en la figura 16.

- e) Método del limnómetro: en una superficie libre los niveles de agua se leen normalmente con una regla graduada o limnómetro por medio de un indicador de nivel de agua instalado en el borde de la superficie. La forma más simple de medir el nivel de un río es con el limnómetro, el cual debe colocarse de tal forma que una porción de él permanezca sumergido en el agua. Puede consistir en una sola escala vertical, la cual se empotra a una estructura fija (pila de un puente, estribo, malecón, etc.); una variante del método es el limnómetro inclinado el cual se coloca sobre el talud de la orilla de las aguas superficiales, graduado de tal forma que la escala indique en forma directa las profundidades verticales. Las marcas deben hacerse de acuerdo a las normas empleadas en las miras taquimétricas o estadias. Si una corriente acarrea sedimentos sólidos o residuos industriales, las señales de la escala corren el riesgo de borrarse; en estos casos se utilizan marcas en relieve o bordes dentellados. Ver figura 17.

Existen además limnómetros registradores, denominados limnígrafos, en los que el movimiento de un flotador queda registrado en una cinta enrollada en un cilindro que gira a una velocidad constante.

3.3.4.2 Frecuencias de las mediciones

El tipo de estudios define la frecuencia con que deben tomarse las lecturas del nivel de agua. Se recomienda una o dos veces al mes cuando el estudio es de reconocimiento. Si existen problemas para efectuar la investigación, por ejemplo, por el efecto de fuertes lluvias o exceso de riego en la napa freática, la frecuencia de las mediciones debe incrementarse hasta inclusive una vez por hora. Otros problemas que requieren de mediciones constantes son la elevación instantánea o gradual o caída del nivel del agua en un curso de agua abierto y su efecto en la capa de agua en las tierras adyacentes: la transmisión del movimiento de la marea y los efectos en la capa de agua cuando un pozo es bombeado.

3.3.5 Red básica de observación

Establecida la red de observación, las lecturas del nivel de agua deben continuar durante largo tiempo, incluyendo preferentemente años secos y húmedos. Al disponerse de un número suficiente de lecturas, deben analizarse sistemáticamente los hidrogramas de todos los puntos de observación. Al hacer la comparación se pueden distinguir diferentes tipos de pozos y piezómetros.

Cada pozo o piezómetro que pertenece a un cierto grupo tiene una respuesta similar al modelo de recarga y descarga de la zona, esto significa que en estos pozos y piezómetros, el nivel del agua empieza a elevarse al mismo tiempo, alcanzando sus valores máximos y mínimos de igual forma. La amplitud de la fluctuación del nivel del agua en los diversos puntos no necesariamente debe ser la misma, pero sí debe mostrar gran similitud.

En un grupo de pozos las lecturas del nivel de agua de uno en particular pueden ser correlacionadas con las de otros pozos del mismo grupo; si dos

pozos se correlacionan satisfactoriamente, uno de los dos puede ser eliminado de la red. Esto reduce la red, dejándola con un número de pozos tipo.

3.3.6 Calidad del agua

Una investigación de la calidad del agua subterránea implica determinar su estado actual, un estudio de variaciones naturales de la calidad, por qué existen y cómo pueden cambiar si se llevan a cabo obras de drenaje agrícola. El bajar la capa de agua por medio de drenaje artificial significa que el agua subsuperficial de las tierras adyacentes y de las capas profundas pueden comenzar a moverse hacia la tierra drenada. Si esta agua es salina la zona drenada o su sistema superficial se cargarán diariamente con cantidades considerables de sales disueltas.

La geomorfología del terreno se relaciona directamente con las variaciones en la calidad del agua subsuperficial, incluyendo hasta las características de relieve de menor importancia como el caso de las llanuras aluviales. Las montañas de arena relativamente altas, son zonas de recarga conteniendo agua subsuperficial de excelente calidad, que a lo largo de su camino aguas abajo puede gradualmente mineralizarse, provocando que en las zonas bajas normalmente el agua sea de menor calidad.

El agua puede ser salinizada en forma natural o artificial. En las zonas bajas de la capa de agua es normalmente muy superficial, especialmente en climas áridos, lo que produce considerablemente el transporte capilar del agua freática a la superficie del terreno, aumentando el proceso de salinización con intensidades elevadas de evaporación. La salinización artificial o producida por el hombre es provocada en zonas regadas que tienen un drenaje inadecuado. Las sales lavadas del suelo durante el riego, alcanzan la napa freática,

Figura 16. Métodos utilizados para determinar la profundidad del agua en pozos y piezómetros. A: Cinta humedecida. B: Sonador mecánico. C: Indicador eléctrico del nivel de agua. D: Registrador automático.

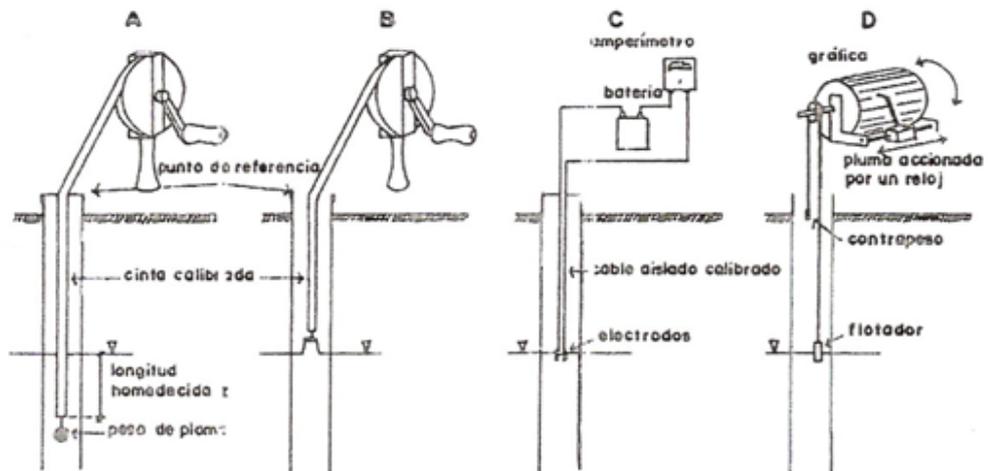
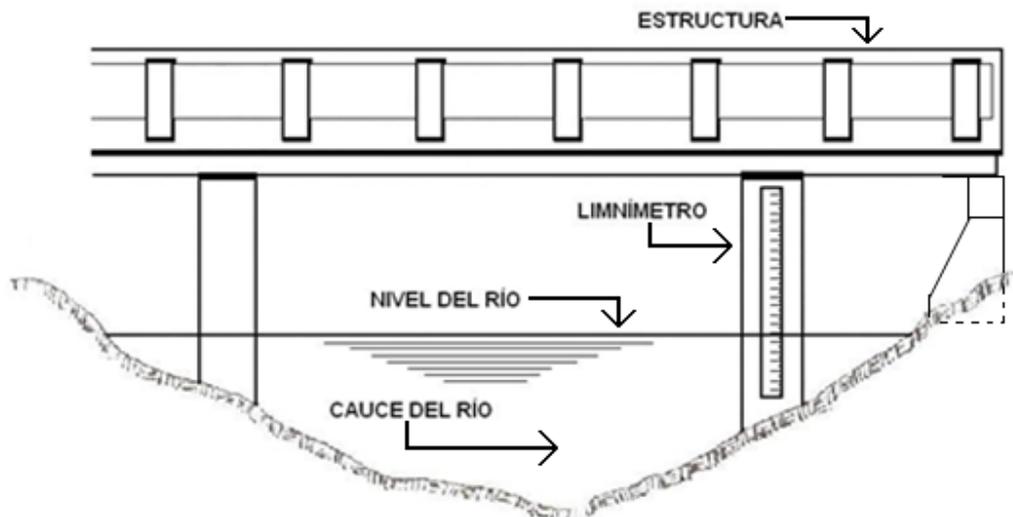


Figura 17. Método de medición por medio de Limnómetro.



resultando cada vez más y más mineralizada si el drenaje natural es también lento o inexistente.

Un conocimiento adecuado de la calidad del agua subterránea es necesario tanto en el caso de la utilización de los pozos para drenaje agrícola como si el agua a bombear ha de ser utilizada para regar cultivos.

3.3.7 Procesamiento de la información del agua subsuperficial

El procesamiento de los datos del agua subsuperficial comprende:

- Registros;
- Hidrogramas de los pozos;
- Mapas del agua subsuperficial.

3.3.7.1 Registros

Implica una recopilación de los datos del agua subsuperficial cuyas lecturas se introducen en una boleta de registro, anotándose en cada observación la información siguiente: fecha, profundidad observada del nivel del agua por debajo del punto de referencia (lectura), profundidad calculada por debajo de la superficie del terreno y elevación calculada del nivel del agua. Debe anotarse además el emplazamiento y características más importantes del punto de observación.

3.3.7.2 Hidrogramas de pozos

Un hidrograma se obtiene al representar para cada observación las lecturas del nivel del agua con respecto al tiempo. Un hidrograma es

fundamental para evaluar las condiciones del agua, ya que éstos proporcionan valiosa información. Por ejemplo:

- a) La velocidad de ascenso o descenso del nivel del agua.
- b) Ayuda a comprender la causa de las fluctuaciones de la capa de agua en combinación con la información sobre los componentes del balance del agua, es decir, precipitación, riego, bombeo de pozos para riego, etc.
- c) Muestra la profundidad de la capa de agua por debajo de la superficie del terreno. Revelan los períodos del año en los que se presentan capas de agua críticas.
- d) Al ordenarse por su semejanza, los hidrogramas permiten delimitar zonas con comportamiento del agua subsuperficial uniforme,
- e) Cuando un hidrograma cubre varios años, da una indicación de las tendencias a largo plazo en el comportamiento del agua subsuperficial, esto es ascenso o descenso general de la capa de agua, o sea recarga o agotamiento de un acuífero.

3.3.7.3 Mapas del agua subsuperficial

Dibujar los datos de agua subterránea en mapas permite un mejor análisis. Los mapas más importantes son:

- Mapas de isolíneas;
- Mapas de profundidad de la capa de agua;
- Mapas de fluctuación del agua subsuperficial;
- Mapas de diferencia de carga hidráulica;
- Mapas de calidad del agua.

a) Mapas de isolíneas: un mapa de este tipo es un mapa de curvas de nivel de la capa de agua. Puede ser preparado para una fecha específica, sin embargo, se elabora normalmente como promedio para una estación o un año. Para su dibujo, se toman los niveles absolutos del agua de todos los puntos de observación en un mapa topográfico y trazando las líneas que unen puntos de igual elevación de napa freática. Se les denomina a las curvas resultantes como líneas equipotenciales, isohipsas o isolíneas de la napa freática. Permiten la configuración de la superficie freática así como el estudio de la dirección y la intensidad del flujo de agua subsuperficial.

Las isolíneas se dibujan interpolando los niveles de agua entre los puntos de observación por medio de cualquier método de interpolación conocido: lineal, gráfico, o a ojo. En cualquiera de los casos debe tomarse muy en cuenta la influencia de la topografía y de las estructuras geológicas (por ejemplo una falla). De esta cuenta las isolíneas deben dibujarse a mano alzada como cualquier curva de nivel, utilizando toda la información disponible topográfica y geológica. Figuras 18 y 19.

b) Mapas de profundidad de la napa freática; es un mapa resultante de la diferencia en la elevación entre curvas de nivel de la superficie del terreno y las de la napa freática, un mapa que permite apreciar la profundidad de la napa freática por debajo de la superficie del terreno es de especial

interés para delimitar la extensión de la zona que necesitan drenaje. Estos mapas se dibujan para fechas críticas, por ejemplo: cuando se presentan las napas freáticas más altas.

- c) Mapas de fluctuación de la capa de agua: son construidos para un período dado, los cambios del nivel del agua en los pozos de observación, dibujando líneas de igual cambio. Se dibujan las diferencias en nivel agua en los pozos de observación o superponiendo dos mapas de isolíneas de la capa de agua y tratando las diferencias de nivel de agua en las intersecciones de las isolíneas. Ver figura 20.
- d) Mapas de diferencia de carga hidráulica: en lugares donde existen en la parte de abajo acuíferos semiconfinados, un piezómetro superficial en la capa superior libre y otro profundo en el acuífero, pueden mostrar niveles de agua diferentes. Cuando la carga potenciométrica en el acuífero es mayor que en el nivel del agua freática en la capa superior libre, ésta se recarga del acuífero. Cuando la carga potenciométrica es menor que el nivel de agua freática en la capa superior, esta capa cede agua al acuífero subyacente. En estos casos es muy útil construir un mapa de carga hidráulica.
- e) Mapas de calidad del agua subsuperficial: un mapa básico de la calidad del agua es el de conductividad eléctrica de la napa freática superficial y profunda. Al representarse todos los valores de la conductividad eléctrica, pueden dibujarse líneas de igual salinidad (conductividad eléctrica).

3.3.8 Evaluación de los datos de agua subsuperficial

3.3.8.1 Evaluación de los hidrogramas

Las fluctuaciones en el nivel del agua subsuperficial se clasifican en dos clases:

- Cambios producidos por las modificaciones en el almacenamiento del agua subsuperficial;
- Cambios en la presión atmosférica, deformación de los acuíferos y anomalías en los pozos.

La mayor parte de las fluctuaciones en los niveles de agua son causadas por cambios en el almacenamiento. Estos cambios son los que interesan ya que son el resultado neto del sistema de recarga y descarga predominante. En condiciones naturales existe equilibrio anual de la recarga y descarga. La elevación de los niveles de agua indican los períodos en los que la recarga excede a la descarga y los niveles de agua en disminución, los períodos en que la descarga excede a la recarga. Ver figura 21.

No siempre existe una relación clara entre el efecto de la precipitación y el comportamiento de la capa de agua subsuperficial debido principalmente a:

- a) Las diferencias en la porosidad efectiva causan la elevación de la capa de agua de una forma no uniforme;
- b) Parte de la precipitación puede no alcanzar la capa de agua porque es descargada como escorrentía superficial y/o almacenada en la zona no saturada por encima de la capa de agua.

- c) La evapotranspiración puede causar un descenso de la capa de agua superficial cuando las pérdidas de agua resultantes exceden a la recarga neta del agua subsuperficial.

El efecto del bombeo provoca cambios en el almacenamiento y dependen de la longitud del período de bombeo así como del caudal del mismo. Un bombeo relativamente continuo, con fines de riego, durante una gran parte del año produce una influencia residual muchos meses después de que el mismo se haya terminado.

Luego de correlacionar los cambios correspondientes del nivel de agua con las diversas causas que originan la recarga y la descarga, los hidrogramas se ordenan por grupo. De estos grupos se puede obtener cuáles son los períodos críticos del año en los que la capa de agua está demasiado alta y necesita ser controlada por un drenaje artificial. Además puede obtenerse a qué componentes de la recarga (precipitación, pérdidas de agua en canales, pérdidas de riego, flujo subterráneo) es sensible el sistema de agua subsuperficial

3.3.8.2 Evaluación e interpretación de los mapas de isolíneas

La importancia principal en las investigaciones del agua subsuperficial que forman parte del estudio de drenaje pueden sintetizarse de la siguiente forma:

- a) Dirección de flujos: las curvas de nivel de un mapa de la capa de agua son líneas equipotenciales; por ello la dirección del flujo del agua freática es perpendicular a las líneas equipotenciales, ver figura 22.

Figura 18. Construcción de isólinas por interpolación lineal

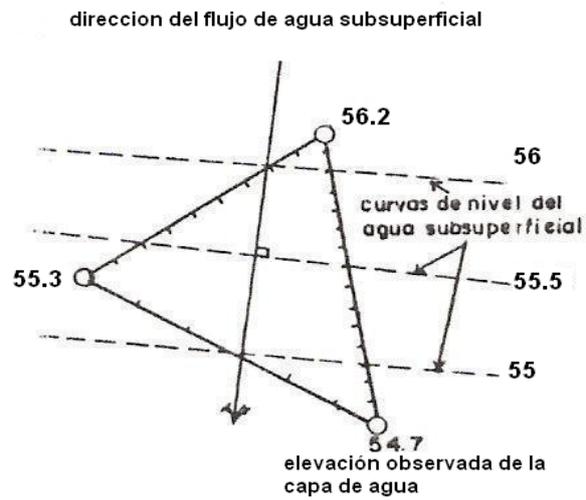


Figura 19. Dos ejemplos de isólinas de la capa correcta e incorrectamente dibujados

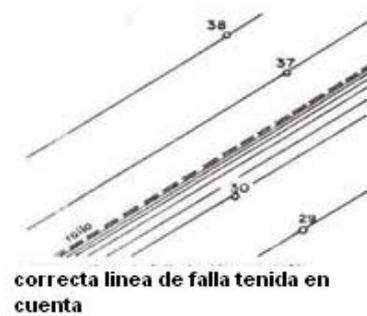
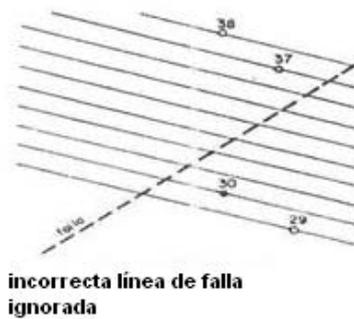


Figura 20. Construcción de los mapas de fluctuación del nivel del agua por superposición de mapas de isolíneas del agua subsuperficial de dos años hidrológicamente diferentes. A: niveles de agua actuales. B: Niveles de agua pasados. C: mapas A y B superpuestos. D: mapas de fluctuación resultante del nivel del agua.

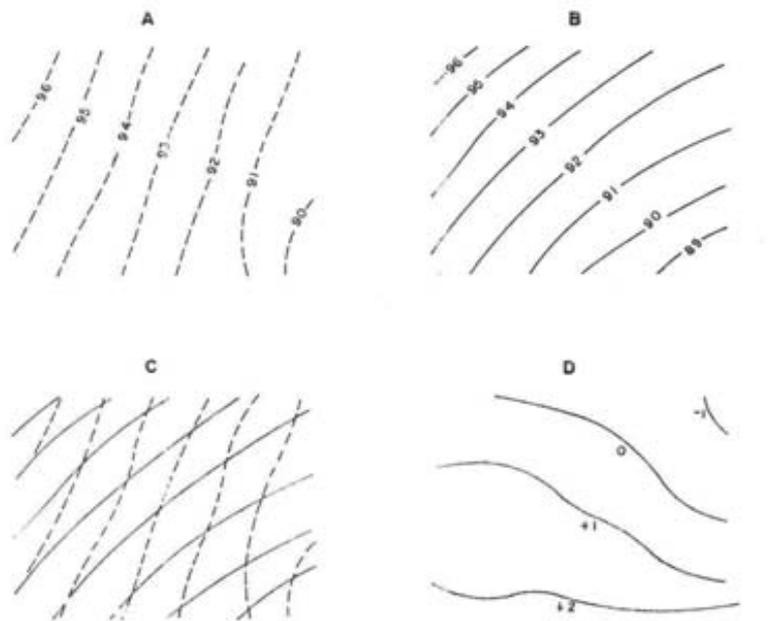
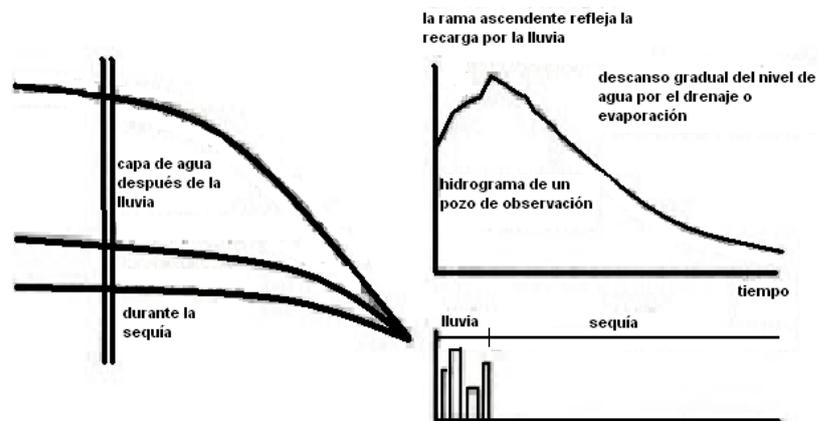


Figura 21. Hidrograma mostrando la elevación de la capa de agua durante la recarga por la lluvia y el subsiguiente descenso durante la sequía.



- b) Gradiente hidráulico: un mapa de isolíneas de la capa de agua es una representación gráfica del gradiente hidráulico de la capa de agua o superficie potenciométrica, Los gradientes hidráulicos constituyen la base para el cálculo del caudal del flujo subsuperficial a través de secciones transversales. La velocidad del fluido (v) varía directamente con el gradiente hidráulico y la velocidad del flujo constante, el gradiente está inversamente relacionado con la conductividad hidráulica (k) o $v = kI$ (ley de Darcy). Esta ley fundamental gobierna la interpretación de los gradientes hidráulicos de las napas freáticas. Si la velocidad del flujo en dos secciones transversales de igual profundidad y anchura es la misma, pero una sección transversal muestra un gradiente hidráulico mayor que la otra, su conductividad hidráulica debe ser menor. Gradientes hidráulicos pequeños reflejan una conductividad hidráulica alta de material transmisor de agua, de esta cuenta, si en una cierta dirección del flujo el espaciamiento de las isolíneas se reduce (los gradientes hidráulicos aumentan) la conductividad hidráulica del material se reduce.
- c) Montículos de agua subsuperficial: un montículo en la capa de agua o en la superficie potenciométrica es causado normalmente por la recarga ya sea por riego, precipitación, etc., o desde abajo por medio de un flujo subsuperficial ascendente de capas profundas etc. ver figura 23. Cuando una elevación local en la capa de agua no es debida a la recarga por riego o por alguna otra fuente superficial de naturaleza local, se puede estar seguro que es provocada por un flujo ascendente del agua subsuperficial desde capas profundas.
- d) Depresiones del agua subsuperficial: una depresión local en la capa de agua es debida normalmente a bombeos y si existe una caliza cárstica bajo el terreno aluvial, el agua subsuperficial puede perderse localmente a través de las grietas o agujeros de la caliza. La curvatura de las isolíneas

de la capa de agua en la proximidad de las corrientes o de otros elementos de agua superficial indica que es una corriente influente o efluente. Una corriente influente es aquella que en su recorrido pierde agua y contribuye a la recarga. Una corriente efluente es por el contrario, una corriente que se alimenta del agua subsuperficial. Cuando las corrientes son influentes, las isolíneas se curvan aguas abajo y para las corrientes efluentes se curvan aguas arriba.

- e) Resistencia radial: es la resistencia que tiene que vencer el agua subsuperficial durante su curso hasta el lecho del río debido a la contracción de las líneas de flujo en la proximidad del río. Los dobleces en las isolíneas cerca de las corrientes efluentes pueden tener formas distintas debido a diferencias en la resistencia radial de la corriente. Una fuerte inflexión de las isolíneas cerca de los arroyos indica una resistencia radial alta, y una inflexión menor una resistencia radial menor. Ver figura 24.
- f) Evaluación de otros tipos de mapas: las zonas de recarga y descarga son detectadas fácilmente evaluando mapas de fluctuación. Zonas con grandes fluctuaciones son de recarga y presentan zonas topográficamente altas; mientras que en las zonas con baja fluctuación son zonas de descarga. Un cambio en la capa de agua implica un cambio en el volumen de agua subterránea almacenada en el suelo. Si se conoce la porosidad efectiva de la zona en la que se tienen lugar los cambios de la capa de agua, el cambio en el almacenamiento subterráneo en un período de tiempo dado puede expresarse por:

$$s = \zeta h$$

donde:

s = cambio en el almacenamiento del agua subterránea en un período de tiempo dado por unidad de superficie horizontal (m),

ϕ = porosidad efectiva del suelo (adimensional).

h = cambio en la elevación de la capa de agua en un período de tiempo dado (m).

El análisis de mapas puede hacerse aún más preciso y esto dependerá de la importancia del estudio. De ser así puede enriquecerse la información analizando los mapas de calidad de agua así como los de diferencia de carga hidráulica, ya que ellos permiten conocer la salinidad del suelo y evaluar el flujo vertical a través de capas semipermeables o de baja conductividad hidráulica.

Figura 22. Modelo de líneas equipotenciales y de flujo

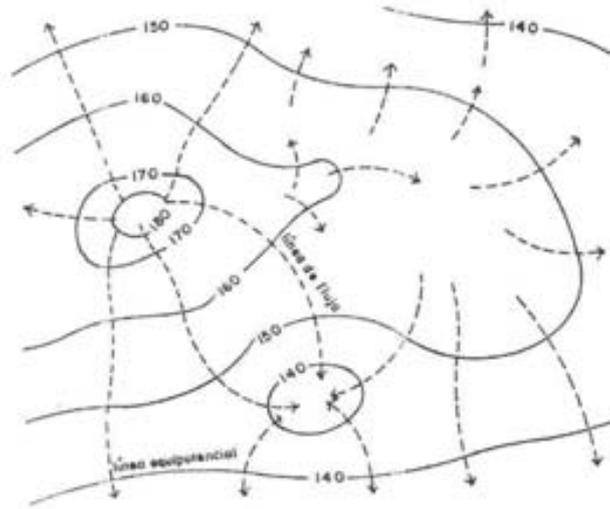


Figura 23. Mapa de isolíneas de la capa de agua. A: zona de recarga, río influente (que pierde). B: la elevación de la capa de agua es la misma que la del nivel del agua en el río. C: zona de descarga, río efluente (que gana). D: área de descarga, pozos con bombeo. E: zona de recarga, percolación profunda del agua de riego.

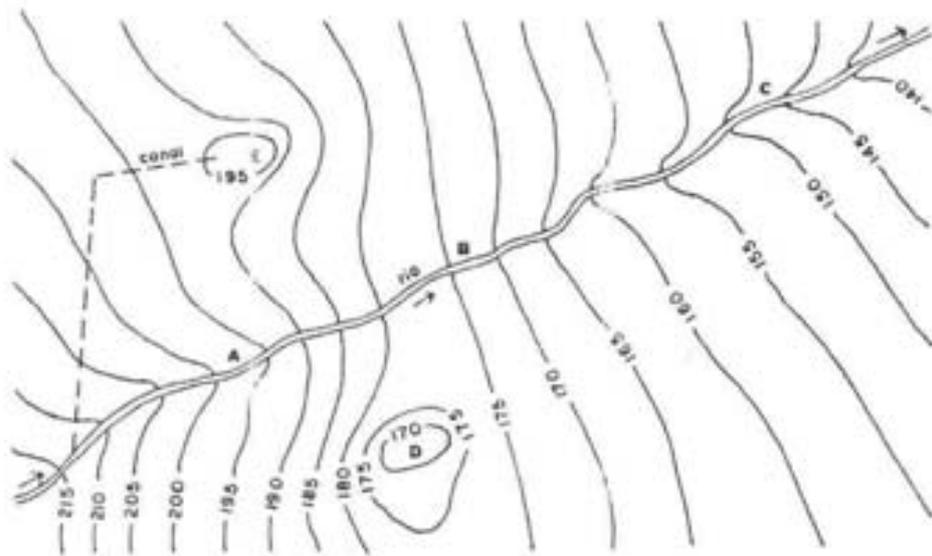
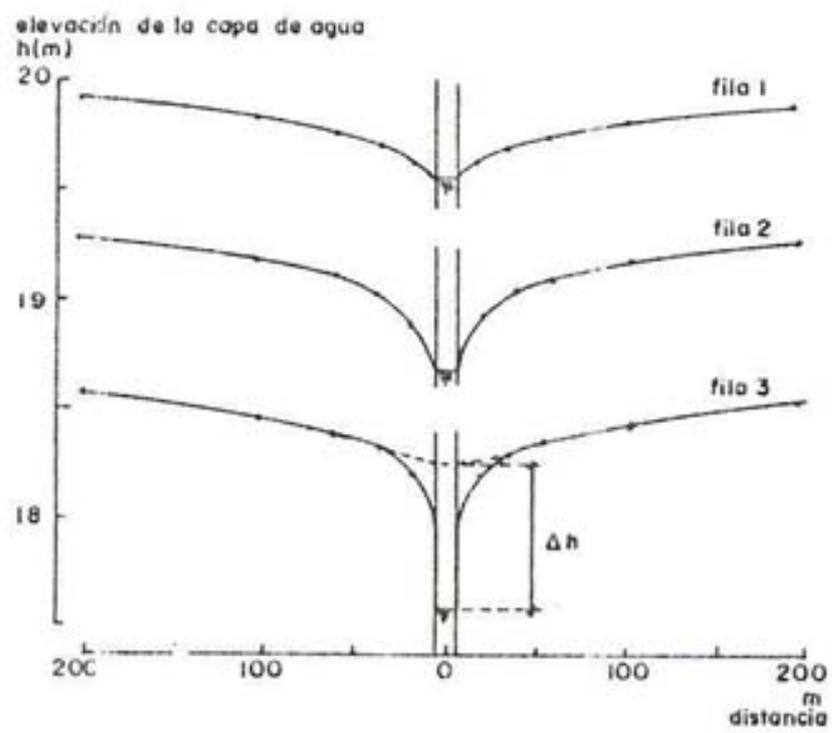


Figura 24. Elevación de la capa de agua en tres líneas de piezómetros perpendiculares a un arroyo. La curvatura en la proximidad inmediata del arroyo refleja la resistencia radial (W) que es mucho mayor en la tercera fila que en la primera fila



CONCLUSIONES

1. En todo proyecto de riego es necesaria la inclusión del aspecto de drenaje debido a que los excesos de agua mal manejados producen inundaciones, deficientes o malas cosechas, etc., que redundan no sólo en el aspecto económico sino en la calidad de vida de la población.
2. Es necesaria la orientación y asesoría en las poblaciones ubicadas en regiones que padecen este tipo de problemas, sobre las técnicas apropiadas en el manejo y uso de las tierras agrícolas, tomando en cuenta las condiciones ecológicas particulares del área.
3. Las estaciones meteorológicas existentes en nuestro país no cumplen a cabalidad con su función debido básicamente a los pocos recursos con que cuenta la institución encargada de su control y mantenimiento, así como a la poca importancia que se le da a este tipo de servicio por parte de la población en general.
4. Debido a la poca información hidrométrica existente deben compararse datos de regiones homogéneas, asumirse y en el peor de los casos, emplear información de otros países con características similares al nuestro. Es, entonces, necesaria la divulgación, promoción y desarrollo de este tipo de proyectos, cuyos beneficios son a mediano y largo plazo, al integrar a la producción regiones hasta el momento abandonadas o mal explotadas.

5. Deberá estudiarse más a fondo la fluctuación de la napa freática bajo condiciones de riego. Aunque la posibilidad de la elevación de la napa freática debida al riego, a un nivel peligroso para las plantas es poca, si los suelos son de conductividad hidráulica alta, comúnmente de 5 – 10 cm/hr.

6. La calidad de agua de los zanjones en la región de los litorales del país, es normalmente de C2S1 y C3S1, esto indica un alto contenido de sales. No sólo se manifiesta en el agua superficial sino en la subsuperficial debido a la cercanía del mar. Esto requiere un estricto control de calidad para evitar que en determinado momento el nivel de salinidad aumente con el consabido resultado de daño a los cultivos.

7. La red de drenaje existente en el área de cualquier proyecto, deberá ser sometida a limpieza, corrección y remodelación de todos y cada uno de los canales con el fin de mejorar las capacidades de conducción actuales.

8. En las regiones costeras donde el problema de las fluctuaciones de la marea provoca inundaciones en las salidas del agua, deberá definirse una zona de almacenamiento temporal fuera de los límites de explotación agrícola.

RECOMENDACIONES

1. Promover entre las instituciones dedicadas a las actividades agrícolas, proyectos de drenaje que permitan el aprovechamiento total del recurso tierra que en el país es tan limitado.
2. Requerir el apoyo necesario a instituciones internacionales que poseen no sólo una mayor experiencia sino los métodos y técnicas modernas para la ejecución de programas de drenaje agrícola.
3. De igual forma, capacitar profesionales y técnicos nacionales para que la tecnología pueda ser mucho mejor aplicada y adaptada a nuestro medio. En la actualidad, las personas que se dedican a esta actividad no son suficientes en comparación con las necesidades del país.
4. Que las mediciones en la red hidrométrica se efectúen en forma periódica para contar con una mejor información, más exacta y veraz.
5. Promover dentro de las instituciones agrícolas la necesidad de crear más estaciones de control e instruir y capacitar a la misma población para que tomen conciencia de la importancia de contar con este tipo de información para beneficio de sus mismas comunidades.
6. Divulgar y apoyar los métodos de conformación del terreno que a pesar de que requieren de uso de maquinaria son factibles para el mejoramiento de las zonas inundadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. INSTITUTO INTERNACIONAL PARA APROVECHAMIENTO Y RECUPERACIÓN DE TIERRAS. **Principios y aplicaciones del Drenaje**, Tomo II. Wageningen, Holanda: 1977.
2. KONG, PABLO. **Principios de ingeniería aplicados al diseño y ejecución de proyectos de drenaje de tierras agrícolas**_ Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC. Guatemala, 1976.
3. LUTHIN, JAMES. **Drenaje de tierras agrícolas**. México: LIMUSA. 1974.
4. ROJAS, RAFAEL. **Drenaje superficial de tierras agrícolas** México: Centro Interamericano de desarrollo integral de aguas y tierras, s.f. 1975.
5. SAMAYOA, MARTA LIDIA. **Estudio Preliminar de los problemas de inundación y de drenaje en el Parcelamiento La Blanca** Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC. Guatemala: 1976.

APÉNDICE

CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS SUELOS

Servicio de Conservación de Suelos

El siguiente es un resumen de la clasificación hidrológica de los suelos, según el SCS y tomado de CIDIAT, DRENAJE SUPERFICIAL DE TIERRAS AGRÍCOLAS.

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planeamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía a partir de la precipitación. Las propiedades de los suelos son consideradas para estimar la tasa mínima de infiltración para suelos “desnudos” luego de un humedecimiento prolongado y profundidad hasta un estrato de permeabilidad muy lenta. La influencia de la cobertura vegetal es tratada independientemente.

Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos; A, B, C y D de acuerdo al potencial de escurrimiento.

- A. Bajo potencial de escorrentía: suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando están muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas de bien a excesivamente drenados. Esos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

- B. Moderadamente bajo potencial de escorrentía: suelos con tasas de infiltración moderadas cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos,

moderadamente bien drenados o bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas (suelos que no están en los grupos A, C o D).

C. Moderadamente alto potencial de escorrentía: suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consiste de suelos con un estrato que impide el movimiento de agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcali o suelos con mesas de agua moderada. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad.

D. Alto potencial de escorrentía: suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consiste en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con **“claypan”** o estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcali y suelos poco profundos sobre material casi permeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

CAPACIDADES HIDROLÓGICAS DE LAS CLASES TEXTURALES

CLASE TEXTURAL	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO %	POROS GRANDES (G) %	POROSIDAD DISPONIBLE (AWC) %
Arena gruesa	24.4	17.7	06.7
Franco arena gruesa	24.5	15.8	08.7
Arena	32.3	19.0	13.3
Arena franca	37.0	26.9	10.1
Arena franca fina	32.6	27.2	05.4
Franco arenosa	30.9	18.6	12.3
Franco arenosa fina	36.6	23.5	13.1
Franco arenosa muy fina	32.7	21.0	11.7
Franca	30.0	14.4	15.6
Franca limosa	31.3	11.4	19.9
Franco arcillo arenosa	25.3	13.4	11.9
Franco arcilloso	25.7	13.0	12.7
Franco arcillo limoso	23.3	08.4	14.9
Arcillo arenoso	19.4	11.6	07.8
Arcillo limoso	21.4	09.1	12.3
Arcilla	18.8	07.3	11.5

S = capacidad total de almacenamiento (porosidad total – humedad a atmósferas)

G = agua gravitacional = porosidad total – capacidad de campo

AWC = agua disponible (S – G)

NOTA: Tomado *de Land Capability: An hydrologic Response unit in agricultural Watersheds*

CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA (Potencial de Escorrentía)

TEXTURA	I	II	III	IV	V	VI	VII
	SUELOS BIEN DRENADOS			MODE RADA MENTE BIEN DRENA DOS	IMPERFECTAMENTE DRENADOS	POBREMENTE DRENADOS	MUY POBREMEN TE DRENADOS
	PROFUNDIDAD A LA ROCA MADRE						
	POCO PROFUNDO (0.45m)	MODERADAM ENTE PROFUNDO (0.45 - 0.90m)	PROFUNDO (0.90m)				
1. Texturas medias: mezcla de texturas gruesas y finas	C - (+D)***	+ C	B - (+B) *** (+C)*	+C	C	+ D	D
2. Textura gruesa	+ C - (+ D) ***	B	+ B - (A)*** (B)**	B	+ C	+ D	D
3. Textura fina	C - (D)***	C	+ C - (B)**	C	C	D	D
4. Textura media sobre roca fracturada verticalmente	+ C	B	+ B	+C	C	+ D	D
5. Textura gruesa sobre roca fracturada verticalmente	B	+ B	A	B	+ C	+ D	D

Cambios en clasificación para suelos bien drenados

* Existencia de *Fragipan* o "*claypan*" en suelos profundos

** Suelos de profundidad mayor de 3m y excesivamente bien drenados