

DESCARTE

5394

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



**PROBLEMAS HIDRAULICOS DE DRENAJE
AGRICOLA.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A

JESUS GRACIA SANCHEZ

MEXICO, D. F.

1974



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A M I M A .

A M I P A D R E .



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
México

FACULTAD DE INGENIERIA
Exámenes Profesionales
Núm. 40-130
Exp. Núm. 40/214.2/

Al Pasante señor JESUS GRACIA SANCHEZ,
P r e s e n t e .

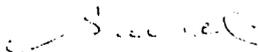
En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección promuso el Profesor Ing. José Luis Sánchez Bibriesca, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

"PROBLEMAS HIDRAULICOS DE DRENAJE AGRICOLA"

- I. Aspectos generales de drenaje
- II. Principales elementos de drenaje
- III. Comparación de los métodos de solución
- IV. Métodos de solución para el problema de flujo transitorio
- V. Conclusiones

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá -- prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de -- seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la -- Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente,
"POR MI HAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., a 5 de agosto de 1974.
EL DIRECTOR


ING. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON


EVC/GSA/elt.

C O N T E N I D O :**RESUMEN.**

CAP. I ASPECTOS GENERALES DE DRENAJE.

CAP. II PRINCIPALES ELEMENTOS DE DRENAJE.

CAP. III COMPARACION DE LOS METODOS DE SOLUCION.

CAP. IV METODO DE SOLUCION PARA EL PROBLEMA DE FLUJO TRANSITORIO.

CAP. V CONCLUSIONES.

APENDICE: DATOS SOBRE EL PROGRAMA UTILIZADO.

RESUMEN.

Este trabajo intenta principalmente, hacer una comparación entre los diferentes métodos de solución de problemas de drenaje. Se sabe que la forma de determinar los espaciamientos y las profundidades de drenes enterrados o zanjas es semi-empírica, por lo que es necesario determinar un método racional que solucione satisfactoriamente este problema.

Se pretende probar que los problemas de drenaje son en su mayor parte con condiciones de flujo en estado no permanente (transitorio), por lo que es necesario solucionarlos como tales; puesto que hasta hace poco tiempo se han resuelto, considerando que el régimen es estacionario. Se intenta determinar en este trabajo la magnitud de los errores inducidos por esta suposición.

Finalmente se propondrá un método de solución a la ecuación que representa el problema de flujo en estado transitorio y se discutirá su aplicabilidad.

C A P I T U L O I .

ASPECTOS GENERALES DE DRENAJE.

IMPORTANCIA DEL DRENAJE.

UTILIDAD DEL DRENAJE.

El objetivo del drenaje agrícola es controlar el régimen de humedad en el suelo, cuando debido a causas naturales o artificiales se introduce mayor cantidad que la necesaria.

Se ha hecho una clasificación de zonas de acuerdo con sus características; se convino en llamar "zonas húmedas" a aquellas donde es más importante drenar que regar, y "zonas áridas" a los lugares donde la carencia de agua es más importante que el exceso.

En las "zonas húmedas" es necesario mantener el nivel freático a una profundidad que permita la correcta aereación del suelo. En las "zonas áridas" además de la aereación, se necesita la protección del ensalitramiento que en este tipo de zonas es muy común.

EFECTOS DEL EXCESO DE AGUA SOBRE EL CULTIVO Y EL SUELO.

Cuando se produce la saturación de un suelo, se evita la aereación del mismo, lo que provoca varios efectos nocivos en las plantas, entre los que destacan:

- a) En suelos inundados desaparece el oxígeno.
- b) Disminuye la velocidad de descomposición de -

la materia orgánica.

c) Se desarrolla una acumulación de hierro reducido, manganeso y iones azufre, éstos en combinación de los productos reducidos o parcialmente oxidados son perjudiciales.

d) Se lava el fósforo y otros cationes.

e) Se reducen la transpiración, fotosíntesis, la extracción de nutrientes y la respiración.

f) Hay indicios de que al inundar se produce un crecimiento anormal en la planta. (Esto posiblemente debido a una interferencia del intercambio y la acumulación de auxinas. Por deficiencia de oxígeno).

g) Las inundaciones en días calurosos producen escaldaduras en los cultivos.

h) Se facilita el ataque de enfermedades a plantas y el desarrollo de parásitos.

i) Un elevado nivel freático limita la penetración de la raíz.

j) Hay reducción en la temperatura del suelo. Un suelo mojado requiere de más calor que un suelo seco. Entonces el período de crecimiento se acorta.

k) Se presentan las sales y el alkali en el suelo o en el nivel freático, y tienden a concentrarse en la zona radicular o en la superficie del terreno.

l) Los encharcamientos dificultan las operaciones agrícolas y evitan tratamientos uniformes.

RESPUESTAS Y DAÑOS DEL CULTIVO EN INUNDACION.

Una respuesta del cultivo es su adaptación a -- las condiciones de inundación. Frecuentemente en algunos cultivos se desarrollan nuevas raíces funcionales en inundación, con trans-- portación de oxígeno en los espacios intercelulares. Estas raíces pueden ser adventicias o de penetración profunda.

En algunos casos no hay síntomas de adaptación, pero resisten sin sufrir daño, esto depende también del período ve getativo en que se encuentra la planta. Sin tener datos cuantita-- tivos se sabe que una inundación en período de floración afecta -- mucho la producción, en tanto que en período de madurez el daño es mínimo.

Considerando el tipo de sumersión, se puede -- clasificar como parcial o total. Será parcial cuando sólo una par te de la zona radicular esté saturada, y total, cuando hasta los - tallos de las plantas estén inundados.

En el caso de sumersión parcial Bertram (1931), en la referencia 1 presenta datos que muestran, que mientras mayor sea la zona radicular inundada, mayores serán los daños, con una - variación casi lineal.

En el caso de sumersión total los daños casi - siempre son muy considerables, pero es obvio que los daños también están en función del tiempo que dure la inundación. En la ref. 1 se menciona que inundaciones totales de 1 a 3 días causa, más que una baja en el rendimiento una demora del desarrollo. En tanto -- que en una duración de 7 a 15 días provocará desórdenes irrepara--

bles y bajará importantemente el rendimiento de la cosecha.

EFEECTO DEL NIVEL FREÁTICO EN LOS CULTIVOS.

Se sabe que existe un nivel freático óptimo. Y que tanto un nivel freático alto como uno muy bajo afectan la producción del cultivo. A continuación se da una tabla obtenida en la estación experimental de Minsk:

Profundidad del Nivel Freático desde la Su- perficie (m).	Rendimientos	
	Praderas	Cultivos
0.2	36 %	13 %
0.4	37 %	67 %
0.6	100 %	100 %
0.8	90 %	90 %

Cabe aquí hacer notar que el nivel freático --- alto en zonas áridas es doblemente peligroso debido a la salinidad.

NECESIDAD DE METODOS DE SOLUCION MAS APROXIMADOS.

Actualmente la solución de los problemas de drenaje se hace de una forma semi-empírica, y mientras más aumente la necesidad de tierras para cultivo, más urgente será la necesidad de protegerlas contra los excesos de humedad.

El empirismo de las soluciones proviene básicamente, del hecho que la investigación sobre este tema es muy poca - en nuestro país, lo que obliga a obtener, datos, parámetros y soluciones que se han dado en otros países de carácter económico, geográfico y técnico diferente al nuestro, lo que produce en algunos

casos soluciones deficientes.

TIPOS DE DRENAJE.

La recolección del exceso de agua puede hacerse de dos formas: por medio de drenaje superficial y por sub-superficial. En el primer caso se aprovecha la energía potencial -- que existe debido a la elevación, para crear un gradiente hidráulico; por lo que en este tipo de sistemas, es necesario crear pendiente en la superficie libre del agua, para moverla desde el terreno hasta la salida a una elevación menor. Existen varias formas de producir el drenaje superficial, pero esto sólo se hace a nivel empírico, y en general consiste en emparejamiento, nivelación, etc. Frecuentemente este tipo de drenaje sólo es una ayuda en los problemas más comunes de drenaje.

El drenaje sub-superficial es el más utilizado y consiste básicamente en tubos o en zanjas. Existen varias teorías y métodos que analizan el problema de flujo de agua a través de un suelo no saturado. Estos métodos están basados en la ley de Darcy, pero su aplicación es complicada, por lo que siempre se ha buscado un método de solución que pueda ser fácilmente aplicable a los problemas reales.

DRENAJE SUB-SUPERFICIAL.

El flujo de agua en la zona saturada involucra energía mecánica, química y térmica, así como la atracción molecular. En este estudio de drenaje, se considera que sólo las fuerzas mecánicas tienden a mover el agua a través de un suelo.

Cabe recordar que el drenaje sub-superficial -- recolecta el agua de gravedad, dejando al suelo en capacidad de --

campo. Pero existe una zona de transición entre el nivel freático y la zona drenada que retiene agua capilar y que en algunos tipos de suelos es muy importante.

Si fuera posible por medio de la investigación de campo determinar la localización exacta de las capas impermeables, la permeabilidad en todo punto del sistema, la localización de los puntos de energía total de lo que entra y lo que sale, el tiempo y la variación de los cambios de flujo, entonces el problema estaría completamente definido y se podría aplicar una solución exacta. En la práctica los problemas no son definidos en esta forma. Comúnmente los problemas consisten en una combinación más o menos compleja de diferentes variables. El procedimiento es determinar las condiciones de frontera, primero aproximadamente y luego con el detalle que sea necesario, por medio de un reconocimiento y pruebas preliminares. Ciertas situaciones o conjunto de condiciones de frontera son reconocidas como problemas tipo, para las cuales la experiencia o el análisis han dado un criterio de diseño. Después de la investigación de los problemas tipo, los estudios y mediciones de campo necesarias, se harán de acuerdo con el criterio de diseño que será aplicado.

Para tener un criterio de diseño es necesario tener herramienta matemática adecuada, que permita fácilmente resolver un problema. Usualmente se analiza el movimiento de agua a través de un suelo aplicando la Ley de Darcy y para aplicarla existen diversas teorías relativas a la forma en que fluye el agua hacia los drenes. Entre las más importantes se destacan: la teoría del flujo

horizontal, la del flujo radial, la combinación de las anteriores y el análisis odográfico de Van Deemter.

BREVE EXPOSICION DE LAS TEORIAS Y SU APLICACION.

La teoría del flujo horizontal está basada en --
dos hipótesis:

a) Todas las líneas de corriente en un flujo por gravedad son horizontales.

b) La velocidad a lo largo de las líneas de corriente, son proporcionales a la pendiente de la superficie libre -- del agua, pero independientes de la profundidad.

Esta teoría se utiliza donde el flujo es en gran parte horizontal y los drenes son someros si se comparan, el espaciamiento con la distancia de la capa impermeable a la base de los drenes.

La teoría del flujo radial se basa en la suposición de que un tubo puede ser considerado como un pozo horizontal, -- con el agua aproximándosele mediante líneas de corriente radiales. Las hipótesis son:

a) Un suelo homogéneo, isótropo y de profundidad infinita.

b) Un nivel freático plano.

Se aplica esta teoría a suelos homogéneos, isó-- tropos, de gran profundidad y con un nivel freático plano o casi plano.

La combinación de las teorías de flujo radial y horizontal fué desarrollada por Hooghoudt y Ernst. Esta combinación desprecia la convergencia del flujo cerca del dren y son aplicables

a problemas de flujo en estado estacionario, y donde la capa impermeable es o muy superficial o muy profunda.

El análisis odográfico de Van Deemter toma en cuenta la solución de ciertas ecuaciones diferenciales, que satisfagan las condiciones de frontera. Este análisis se usa para calcular drenes con descarga llena.

Entre los métodos existentes para resolver las ecuaciones derivadas de alguna teoría, se destacan: el análisis matemático, el método de las relajaciones, la analogía eléctrica y los modelos físicos.

C A P I T U L O I I .

PRINCIPALES ELEMENTOS DE DISEÑO DE DRENAJE.

La instalación de un sistema de drenaje requiere de un criterio económico, exploración de las condiciones existentes en el lugar de aplicación, previa experiencia en un lugar similar, preparación del diseño, planos y recomendaciones.

Frecuentemente ocurre que en el procedimiento de diseño se hace necesario seleccionar entre dos o más lugares, métodos o materiales. Un criterio para hacer esta selección dependerá fundamentalmente de los aspectos económicos y de los requerimientos físicos del lugar, por lo que el diseñador deberá presentar las diferentes alternativas en cuanto eficiencia de drenaje y costo para que el propietario escoja. Una alternativa a esta selección puede ocurrir cuando la obra es de carácter social; entonces se sopesarán otros factores que en ocasiones son difíciles de evaluar.

CLASIFICACION DE LOS METODOS DE DRENAJE.

Una clasificación muy cómoda de los sistemas de drenaje es la que se hace de acuerdo con el método de remoción del agua y es:

1) Drenaje de **superficie** que consiste en eliminar obstáculos naturales como pueden ser hoyos, montículos, etc. y emparejar el terreno de modo de establecer pendientes, que faciliten el flujo por gravedad del agua sobre el terreno.

2) El Drenaje de **sub-superficie** que consiste en

recolectar el agua almacenada en un terreno mediante sistemas internos o bombeo de pozos.

DESARROLLO DE LOS CRITERIOS PARA DISEÑO DE DRENAJE.

El criterio de diseño se ha desarrollado de dos formas:

a) De datos empíricos obtenidos a través de la evaluación de los actuales sistemas de drenaje.

b) Del análisis teórico del problema, aplicando las ya conocidas leyes físicas y probando la teoría a través de la evaluación de los sistemas ya existentes.

Un ejemplo del criterio empírico son los coeficientes de drenaje usados en el diseño de drenes en áreas húmedas, tales coeficientes son encontrados por la experiencia en muchos sistemas de drenaje ya instalados que sirven para dar protección a cultivos. Tal protección ha sido evaluada cuidadosamente tomando en cuenta la respuesta y producción de los cultivos. Esto se logró midiendo gastos y alturas de nivel freático en el terreno con el sistema de drenaje en consideración.

El análisis teórico aplica los principios o leyes a condiciones de frontera ya conocidas. La expresión matemática resultante explica la acción observada y permite el diseño racional del nuevo sistema. Un ejemplo del análisis teórico es la ecuación de la elipse que sirve para determinar la separación de drenes sub-superficiales con flujo establecido. En la ecuación de la elipse las variables son: conductividad hidráulica del suelo, profundi

dad de la capa impermeable, profundidad del nivel freático, el punto medio entre los drenes y el gasto de agua que se va a extraer. Conociendo o estimando estos datos la ecuación puede ser aplicada a muchos lugares o, mejor dicho, a todos aquellos que cumplan con las condiciones de límites dentro de los cuales la ecuación fué -- derivada.

TIPOS DE PROBLEMAS DE DRENAJE.

Para solucionar correctamente un problema de drenaje, es necesario hacer un buen diagnóstico; algunas veces -- con un breve estudio de campo y comparando con un problema similar se le puede solucionar satisfactoriamente. Pero en otras ocasiones, existen problemas que requieren un reconocimiento más detallado, e investigaciones preliminares para determinar la fuente de agua que causa el problema, cuanta agua hay en el lugar, y determinar entonces cuál es el criterio de diseño adecuado. El sistema de drenaje podrá ser determinado, solamente si se identifica correctamente la naturaleza del problema.

Existen varias formas de clasificar los problemas de drenaje, en este trabajo se adoptó la clasificación en problemas de superficie y de subsuperficie; aunque es claro que una tierra encharcada involucra los dos tipos de problemas. En el diseño de un sistema de drenaje hay que considerar su interdependencia.

PROBLEMAS DE DRENAJE DE SUPERFICIE:

Terrenos planos o casi planos que se encharcan debido a :

10.- Una tierra dispuesta con hoyos y lonas - que evitan o retardan la escorrentía natural. Suelos poco permeables agravan el problema.

20.- Baja capacidad de desalojo de los canales, producen una lenta remoción de agua y por lo tanto se produce un alto nivel en los canales, que causan encharcamiento sobre la tierra por períodos dañinos (ineficiencia de los canales).

30.- Condiciones de salida que mantienen alto el nivel de agua; tales como lagos altos, encharcamientos, o marismas elevadas.

Los métodos de solución a los problemas de drenaje superficial son: nivelación, empobrecimiento, zanjeamiento que conduzca el agua a canales naturales o artificiales. Las evacuaciones inadecuadas pueden requerir el mejoramiento de las salidas para evitar curvas de remanso mediante dispositivos adecuados o mediante bombeo. Los sistemas de desviación son eficientes para prevenir o reducir el encharcamiento del agua superficial cuando la fuente está fuera del área a ser protegida.

PROBLEMAS DE DRENAJE SUBTERRANEO

La causa de este tipo de problemas tiene varios orígenes. Las tierras planas tienden a ser pobremente drenadas, particularmente cuando la permeabilidad del suelo es baja. Niveles freáticos altos ocurren donde el suelo es o muy permeable o muy impermeable, donde el clima es o muy húmedo o muy seco, y donde el terreno es o muy plano o con poca pendiente. Por estas

razones es necesario clasificar los problemas de drenaje sub-superficial de acuerdo con la fuente de exceso de agua y con la forma en que se mueve el agua a través del suelo.

CLASIFICACION DE LOS DRENAJES DE SUB-SUPERFICIE.

a) Nivel freático libre: se alimenta por manantiales, corrientes superficiales, percolación profunda, lluvia, pérdidas de irrigación o escorrentía del agua de un valle que aflora en la salida.

b) Nivel freático sobre un acuífero artesiano.

c) Nivel freático alto.

d) Flujo de nivel freático lateral.

El drenaje de superficie es comúnmente parte integral del sistema de riego, en tanto que el drenaje de sub-superficie tiene como función principal mantener bajo el nivel freático, de modo que no tenga efectos sobre la zona de actividad radicular de las plantas.

Es evidente que la profundidad radicular varía de acuerdo con el cultivo y el suelo. Uno de los principales factores en la altura del nivel freático en áreas áridas es el control de la salinidad y la alcalinidad del suelo y el agua. Esta es la mejor razón para diferenciar el drenaje de sub-superficie entre las zonas áridas y húmedas.

La profundidad de los drenes en climas húmedos es generalmente entre 1 m. y 1.5 metros. El agua es en estas con-

diciones relativamente pura.

Los suelos de climas áridos o semiáridos requieren drenes sub-superficiales de 1.5 m. a 2.10 metros de profundidad. El agua que necesitan los cultivos es dada por irrigación. Comúnmente el agua en este tipo de suelos, es algo salina debido a las sales del suelo o también a los contenidos de la misma en el agua de irrigación. El nivel freático en estas zonas comúnmente tiene una altura de 0.61 m. a 0.75 metros bajo la superficie. Esta profundidad sería adecuada en zonas húmedas, pero en áreas áridas crearían una peligrosa concentración de sal en la zona de la raíz.

CRITERIOS DE DISEÑO.

El criterio para el diseño de sistemas de drenaje, consiste esencialmente, en especificaciones para las condiciones que deben existir en cada área en particular, para tener un nivel óptimo de control sobre el agua requerida por el tipo de agricultura que sea practicado.

Este criterio consiste en dos partes:

- a) La cantidad de agua que es necesario remover para dar un cierto grado de protección al cultivo, y
- b) La profundidad óptima del nivel freático.

La cantidad de agua a remover, a menudo es considerada como el coeficiente de drenaje, puede ser expresada como un cierto tirante de agua a ser removido del área por día, o la razón de flujo por unidad de área, como metros cúbicos por segundo y por hectárea. Para consideraciones de precipitación, y características de descarga, la cantidad removida deberá ser basada en una curva que varíe de acuerdo con el tamaño del área drenada.

Varios factores deben ser considerados en la selección de los criterios de diseño para cada proyecto en particular. Esto incluye los requerimientos de los cultivos, relativos a sus necesidades de agua y tolerancia al exceso, suelo, clima, salinidad en el suelo o en el agua de riego, y el aspecto económico. Dentro de cada caso en particular el criterio puede ser determinado por un análisis detallado de todos los factores involucrados, o por el uso de métodos empíricos basados en la experiencia con problemas similares y consideraciones de los datos físicos disponibles.

SOLUCION DE PROBLEMAS DE DRENAJE DE SUPERFICIE.

Este tipo de drenaje se lleva a cabo de dos formas:

- a) El exceso de agua es colectado y evacuado de la superficie del terreno dentro del área afectada.
- b) Por medio de estructuras fuera del área que, alejen el agua de la zona a proteger.

En cualquier caso, el sistema es convenientemente dividido en tres partes fundamentales:

1o.- Sistemas de colección. cunetas, zanjas, hileras de zanjas y zanjas de desviación, son partes del sistema que recolecta el agua del terreno.

2o.- Sistema de disposición: esta es la parte del sistema que recibe el agua y la conduce. Usualmente es una zanja abierta hasta la salida.

3o.- Salida. Este es el punto final del -

sistema de drenaje.

El perfil de la superficie del agua es el primer punto en el diseño del sistema de zanjas. En zanjas abiertas el gradiente hidráulico es el perfil de la superficie libre del agua. Usualmente la investigación de las condiciones de salida del drenaje de superficie establecen el punto de control hidráulico más bajo, para el diseño de los sistemas de descarga. Otros puntos de control son las elevaciones del terreno en las zonas más bajas, y otras restricciones tales como alcantarillas, puentes y vertedores. El diseño de los sistemas de descarga involucra entonces, el cálculo del perfil de la superficie libre del agua, a través de los puntos de control para secciones de zanjas conocidas o supuestas.

El teorema de Bernoulli es usado para calcular el gradiente hidráulico en condiciones de flujo establecido. Las pérdidas de energía debidas a fricción son determinadas por la fórmula de Manning para canales abiertos. Las pérdidas de energía en las reducciones causan un flujo no uniforme, tales como los puentes y las alcantarillas, que deberán ser calculados con las fórmulas y coeficientes más aproximados. En las referencias se muestran algunos libros clásicos como 10 y 11 para resolver este tipo de problemas de hidráulica elemental. Dentro de las investigaciones de campo es necesario tener suficiente información para evaluar rugosidades y factores de las secciones transversales, incluyendo las pérdidas de energía por obstrucciones.

En el diseño del drenaje el flujo no establecido puede ocurrir, por la descarga en corrientes fluctuantes. Tal problema puede algunas veces ser resuelto, dividiendo el tiempo en incrementos convenientes, dentro de cada uno de los cuales se puede considerar el flujo como constante o flujo medio.

SOLUCION DE PROBLEMAS DE DRENAJE DE SUB-SUPERFICIE.

La teoría del drenaje describe el flujo de agua en un sistema idealizado de agua-suelo. El problema real es simplificado para poder tener una solución matemática. Hay una variedad infinita de condiciones del suelo que se pueden encontrar en el campo, por lo que las teorías de drenaje solamente se aproximan a las condiciones reales de campo. Antes de aplicar una teoría a un problema real en particular, es necesario examinar las suposiciones hechas en su obtención. Estas suposiciones deberán ser comparadas con las del problema en cuestión. Evidentemente en la mayoría de los casos las suposiciones no corresponderán exactamente a la situación real, por lo que es necesario usar un buen criterio para aplicar la teoría. En algunos casos la teoría será bastante buena para determinar el espaciamiento y la profundidad de los drenes, en otros casos la teoría es útil sólo como una primera aproximación, y en un tercer caso las ecuaciones de drenaje sólo podrán dar una idea de la solución del problema, y ellas a menudo pueden ser aplicadas por personal no adiestrado, que no tenga la experiencia ne-

cesaria.

En adición a los aspectos prácticos de profundidad y espaciamiento de drenes, hay ciertas conclusiones que pueden ser descritas de una examinación teórica del problema, -- conclusiones que no pueden ser alcanzadas por otro camino. Estas conclusiones ayudan a razonar respecto a los problemas en una forma racional y aún ayudan a pensar en una teoría en particular si no hay una aplicable directamente.

Por lo dicho en párrafos anteriores hay una gran variedad de situaciones reales, por lo que es necesario seleccionar las condiciones que parecen prevalecer en la región y aplicar la teoría apropiada. La meta de los sistemas de drenaje es resolver cada problema real con sus respectivas características lo más eficientemente posible, tomando en cuenta los problemas de tipo constructivo, económico y previendo la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas durante las épocas de lluvia. En el análisis de los problemas en áreas húmedas los holandeses han sido líderes en el desarrollo de técnicas y métodos que puedan ser usados para este análisis. Muchos de estos métodos están todavía en desarrollo. Solamente las técnicas probadas serán indicadas aquí. Técnicas más precisas serán indudablemente desarrolladas en el futuro. Pero los métodos dados aquí son una aproximación satisfactoria para el problema.

Una oficina norteamericana "The Bureau of Reclamation" ha hecho investigaciones en regiones áridas y ha lo-

grado desarrollar un buen análisis de los problemas de drenaje. Aunque sí bien los problemas en áreas irrigadas son algo diferentes que los encontrados en áreas húmedas, hay una gran similitud entre los métodos de análisis.

Una solución importante del problema de drenaje es el resultado del trabajo del Dr. S. B. Hooghoudt. El consideró que el nivel freático está en equilibrio con la lluvia. El problema resuelto por Hooghoudt es esencialmente éste: ¿Qué altura tendrá el nivel freático para una cierta lluvia, — permeabilidad del suelo, profundidad y espaciamiento de drenes? . Es necesario conocer la profundidad de la capa impermeable que restringe el espaciamiento de los drenes, y la infiltración profunda. Si los drenes están instalados el nivel freático ascenderá hasta que el flujo en los drenes sea igual a la cantidad de lluvia o agua de irrigación infiltrada a través de la superficie del suelo. Cuando sucede esto se dice que el nivel freático está en equilibrio con la lluvia o el agua de irrigación. El problema es establecer la posición del nivel freático en el equilibrio. La posición del nivel freático dependerá de los siguientes factores:

- 1) La frecuencia de lluvia o de agua de irrigación.
- 2) La conductividad hidráulica del suelo.
- 3) La profundidad y espaciamiento de los drenos.
- 4) La profundidad de la capa impermeable.

Otros factores que se deben tomar en cuenta - en la solución son la variación de la cantidad de agua que toma - el cultivo, el almacenaje profundo, la estratificación y otros -- más que en el análisis común se han despreciado para simplificar el tratamiento matemático.

Los factores anteriores son incorporados al - análisis de manera empírica para obtener la altura a la cual el - nivel freático asciende para un conjunto específico de condicio-- nes.

En Holanda se han hecho una gran cantidad de experimentos sobre la importancia del control del nivel freático para el máximo crecimiento de las plantas. Esto se logra haciendo que por medio del sistema de drenaje en época de lluvias se -- mantenga bajo el nivel freático, y durante la época de sequías o más exactamente de poca lluvia, se introduzca agua a los campos - por el mismo sistema de drenaje.

El problema de estado estacionario ha sido -- exitosamente desarrollado por Hooghoudt en Holanda, y por el Dr. Don Kirkham en los Estados Unidos. Las teorías del primero están basadas en varias suposiciones simplificadas que el segundo en su respectiva teoría no simplifica, lo que da por resultado que la - teoría de Hooghoudt sea mucho más simple que la de Kirkham.

Es evidente que en este trabajo se resuelve - sólo una parte mínima de lo que en la práctica es un problema com plejo. Por lo que el planteamiento total de un problema desde su

concepción hasta su construcción se puede abordar con los métodos mencionados en la referencia 1 y 2 .

En el campo de la investigación las necesidades son muy amplias. Existe bibliografía que muestra soluciones particulares como son diseños de drenes no asolvables, un sistema de drenes con pantallas de recolección prefabricados, o bien teorías de aplicación matemática más compleja como lo sería la aplicación del Principio Variacional a los problemas de drenaje.

Y lo que podría tener más aplicación y utilidad inmediata en nuestro medio sería la determinación de los efectos de niveles freáticos altos en diferentes cultivos; -- efectos de inundación en diferentes épocas del período vegetativo de un cultivo, máximos períodos de inundación y sus efectos cuantitativos en la producción, efectos de un nivel freático altamente salino, efectos de inundación en la composición químico-física del suelo de cultivo, etc.

C A P I T U L O I I I .

COMPARACION DE LOS METODOS DE SOLUCION..

INTRODUCCION.

A continuación se expondrán las principales teorías de drenaje para la solución práctica de los problemas de flujo sub-superficial en estado permanente.

ECUACION DE LA ELIPSE.

El problema analizado por Hooghoudt se -- presenta en la figura No. 1, la cual muestra un suelo homogéneo de permeabilidad conocida con estrato impermeable bajo -- 61. El suelo se supone que será drenado por una serie de zanjas paralelas. El mismo análisis puede ser hecho para drenaje por medio de tubos.

Hooghoudt supone que la lluvia está cayendo con una frecuencia constante. Para simplificar el análisis matemático se supone que el gradiente hidráulico en --- cualquier punto es igual a la pendiente del nivel freático en ese punto. Esta suposición es conocida como la suposición -- Dupuit-Forcheimer. (D-F.).

La suposición anterior (D-F.) implica -- que el agua fluye horizontalmente debido a que las equipotenciales son planos verticales. Esta suposición es errónea, y es más incorrecta cerca de los drenes donde las líneas de ---

corriente son un poco curvas. Sin embargo donde la pendiente -- del agua es relativamente plana la suposición D-F. es válida. Lo importante de tales suposiciones radica en el hecho de que -- las ecuaciones resultantes, dan un valor bastante exacto (dentro del 10 % del valor verdadero) del flujo total en los drenes; -- aunque pensando en las líneas de flujo individuales no son determinadas exactamente.

Las suposiciones de Hooghoudt pueden ser resumidas como sigue:

- 1.- El suelo es homogéneo y de conductividad hidráulica k .
- 2.- Los drenes están igualmente espaciados a una distancia E .
- 3.- El gradiente hidráulico en cualquier punto es igual a la pendiente del nivel freático sobre el punto.
- 4.- La ley de Darcy es válida para el flujo de agua a través del suelo.
- 5.- Existe una capa impermeable bajo los drenes a una profundidad p .
- 6.- La lluvia o el agua de irrigación es --- aplicada con una velocidad v .
- 7.- El origen del sistema de coordenadas es tomado sobre la capa impermeable bajo el centro de uno de los -- drenes.

Con estas hipótesis se obtiene la ecuación -- de la elipse (9) y que tiene la siguiente forma:

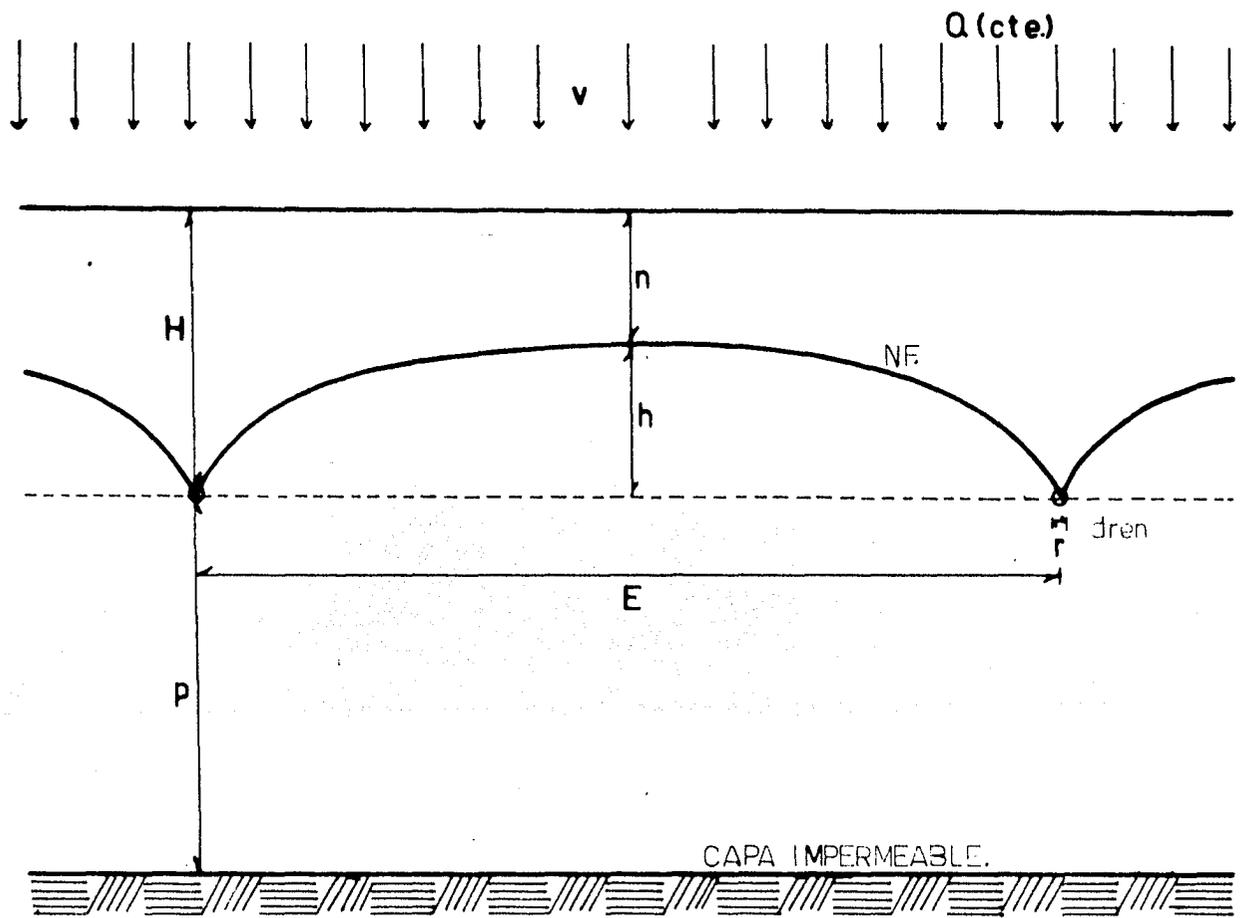


FIGURA 1

$$\frac{y^2}{E^2/k} - \frac{x^2}{E^2/4} = 1$$

Esta fórmula con algunas modificaciones puede ser aplicada a suelos que estén estratificados.

En las referencias 8 y 9 se presenta la aplicación de Hooghoudt para áreas húmedas, en ellas se dan los nomogramas uno para $k/v \leq 100$ y otro para $k/v \geq 100$ con el que se determinan los espaciamientos de los drenes.

Una limitación importante para aplicar esta ecuación es la determinación de la lluvia o irrigación denominada v , pues este parámetro dependerá de otros factores además de la lluvia y el riego, como son la humedad inicial del suelo, pérdidas por interceptación (hojas de los cultivos, de los árboles, etc.), alimentación artesiana, evapotranspiración, etc.

En la aplicación a las áreas irrigadas, existirá el mismo problema de determinar v , pero aquí se deberá tomar en cuenta las necesidades del lavado. Esta necesidad se puede definir, como la parte del agua de irrigación que debe ser lavada a través de la zona radicular de las plantas, para evitar la salinidad del suelo cuando exceden un nivel especificado. Las necesidades del lavado dependen de la salinidad del agua de irrigación aplicada, así como del máximo de concentración de sales que pueden ser permitidas en la zona radicular.

El concepto de necesidad de lavado es muy útil para calcular las cantidades de agua de drenaje que deben ser eliminadas de un lugar. Sin embargo se requiere que haya

un control adecuado del agua aplicada y que esta agua sea igual - a la cantidad que los cultivos necesitan, más las cantidades nece sarias para el lavado.

La máxima concentración de sales, con la --- excepción de la costra superficial formada por evaporación, se --- formará en la base de la zona radicular. Esta concentración será la misma que la concentración de sales en el agua de drenaje, pre viendo que no haya exceso de lavado y que el agua de irrigación - sea aplicada uniformemente en el área.

El incremento en la concentración de sales -- en el agua de drenaje sobre la concentración en el agua de irri- gación, es una consecuencia del uso consuntivo del agua por el -- cultivo. El cultivo tomará el agua del suelo pero dejará los ex cesos de sal. Para resumir, las siguientes suposiciones son im- portantes para una aplicación simple de las necesidades del lava- do:

1o.- El agua de irrigación es aplicada unifor memente en un área.

2o.- No hay lluvia.

3o.- No hay remoción de sal por el cultivo.

4o.- No hay precipitación de sal en el suelo.

Los cálculos están basados en una profundidad equivalente total de agua usada sobre un período de tiempo. Es-- tas suposiciones simplificadoras ignoran la humedad y la carga - de sal en el suelo, la reacción de intercambio catiónico, la pro- fundidad radicular, y el uso de sal por parte del cultivo. Sin -

embargo el concepto ha mostrado ser muy útil.

Otros factores importantes que influyen en la profundidad y espaciamiento de drenes son:

El efecto del nivel freático sobre el crecimiento de las plantas depende de factores tales como: período vegetativo de la planta, condiciones del clima, el suelo, hábitos radicales de las plantas. Un dato importante que la experiencia señala, es que un nivel freático en áreas irrigadas de 90 cm. o más, es útil para prevenir la acumulación de sal en la superficie del terreno, y es una profundidad adecuada para el crecimiento de las plantas.

Donnan y su grupo, después de muchos ensayos en el "Imperial Valley of California" concluyeron que los siguientes factores tienen una gran influencia en la determinación de v (el gasto constante):

- 1o.- Frente de irrigación.
- 2o.- Longitud de recorrido del agua de riego.
- 3o.- Pendiente.
- 4o.- Tipo de suelos.
- 5o.- Coeficiente de infiltración.
- 6o.- Evapotranspiración.
- 7o.- Filtración dentro o fuera del área.
- 8o.- Presión artesiana.
- 9o.- Hábitos de la raíz del cultivo.
- 10o.- Frecuencia de irrigación.

llo.- Control de la humedad del suelo en el tiempo de irrigación.

En el Valle Imperial la alfalfa es la que más agua usa por año, Donnan, Aronovici y Blaney, la han usado con propósitos de diseño de drenaje. Ellos consideran que el 10 % del agua aplicada debe ser considerada dentro del diseño de un sistema de drenaje en el valle imperial. Parte de este 10 % puede ser drenado fuera del área por percolación profunda o por percolación lateral. Por otro lado fuentes laterales y/o percolación artesiana pueden incrementar el 10 % .

Ellos sugieren que el técnico haga una evaluación y revisión, de todos los datos relativos al área problemática, antes de estimar el porcentaje de exceso para ser usado en el diseño.

FORMULA DE KIRKHAM (1958) .

Kirkham ha analizado el problema usando procedimientos exactos. Sus resultados son mejores que los de Hooghoudt pero más complicados en su obtención. Wesseling indica que las dos ecuaciones difieren en un 5%. La fórmula es:

$$h = (EV/k) F(2r/E, PE)$$

Donde:

h = Máxima altura del nivel freático sobre los drenes.

v = Caudal de lluvia.

k = Conductividad hidráulica.

p = Distancia de la capa impermeable al nivel de los drenes.

E = Espaciamiento de drenes.

r = radio de un dren.

y:

$$F = \frac{1}{\pi} \left[\ln \frac{E}{\pi r} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{m} \left(\cos \frac{m\pi r}{E/2} - \cos m\pi \right) \left(\coth \frac{m\pi h}{E/2} - 1 \right) \right] \right]$$

En la referencia 8 se exponen las gráficas que solucionan esta ecuación.

METODO RACIONAL.

En la referencia No. 1 se muestra un método basado en la teoría de Hooghoudt, que con algunas modificaciones se denomina "racional".

Este método sostiene que nunca debe haber una sumersión total, y que aún en caso de lluvia crítica, los drenes deben calcularse de tal modo que la sumersión sea solamente parcial y momentánea. Las aproximaciones permitidas del nivel freático a la superficie del terreno serán:

0.2 a 0.3 m. para las praderas.

0.5 m. para las tierras cultivadas.

0.8 m. para las huertas.

Es necesario determinar el caudal caracterís

tico que será el gasto que deben sacar los drenes cuando se presente la lluvia crítica y en base a esto se aplicarán las fórmulas:

$$E^2 = \frac{4kh^2}{q_c}$$

si los drenes están apoyados en la capa impermeable.

$$\delta \quad E^2 = \frac{4k_s h^2}{q_c} \quad \frac{8k_s h \varphi}{q_c}$$

si los drenes están a una distancia p de la capa impermeable.

Donde:

E = Espaciamiento entre los drenes.

k = Coeficiente de permeabilidad del estrato - sobre los drenes.

h = Altura del nivel sobre los drenes.

q_c = Caudal característico.

k = Coeficiente de permeabilidad del estrato - bajo los drenes.

φ = Coeficiente que toma en cuenta la profundidad de la capa impermeable.

La última ecuación generalmente se resuelve por tanteos, suponiendo diferentes valores de E .

La determinación de q_c estará en función directa de v , que es la intensidad de lluvia crítica para una duración y frecuencia fijas que son determinadas por algún estudio hidrológico.

MÉTODOS DE SOLUCION A LOS PROBLEMAS DE FLUJO TRANSITORIO.

En el capítulo IV se desarrollará ampliamente el tema de problemas de flujo transitorio, y se mostrarán dos procedimientos de solución; uno gráfico presentado por U.S.B.R. y otro por diferencias finitas, que es el método que se pretende demostrar es el más versátil y fácil.

En este capítulo se utilizarán apriori estos métodos, con el objeto de ilustrar las diferencias en los resultados aplicando cada uno de ellos.

COMPARACION DE LOS DIFERENTES METODOS.

Se seleccionará un problema típico de drenaje, y se solucionará con cada uno de los métodos. Comúnmente el problema de drenaje consiste en: dado un terreno, unas características hidrológicas y una política en cuanto a la tolerancia de las plantas a la inundación, determinar el espaciamiento y la profundidad de los drenes. Con objeto de hacer más ilustrativas las diferencias entre las soluciones se expondrá este problema y el inverso; o sea que, dado un espaciamiento, profundidad, etc. a qué tipo de lluvia o condiciones hidrológicas corresponde.

Caso 1 :

Se tiene un suelo con una permeabilidad ---

$k = 1.2$ m/día, la conductividad específica $s = 0.15$. La lluvia crítica tiene un valor de 0.0124 m/día para la región a proteger. (Ver fig. 1).

Debido a los métodos de excavación, se pueden instalar los drenes hasta una profundidad de $H = 2$ m. Los sondeos indican que la capa impermeable está a 8 m. de profundidad, o sea $p = 6$ m. La política a seguir es tratar de mantener el nivel freático a 1 m. o sea $n = h = 1$ m.

Se quiere determinar ¿Qué espaciamiento deben tener los drenes?

a) Método racional.

$$k_s = k_i \quad ; \quad v = 0.0124 \text{ m / día}$$

$$q_c = 8.64 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{día}}$$

De la tabla de la pág. 181 - Ref. 1

$$\varphi = 2.64$$

lo que da:

$$E = 60 \text{ m.}$$

b) Ecuación de la Elipse.

Con los nomogramas de la pág. 157 - Ref. 9 .

$$\text{Como } \frac{k}{v} = 100 \quad \text{y} \quad d' = 3.65 \text{ m.}$$

$$E = 46 \text{ m.}$$

o) Fórmula de Kirkham.

Utilizando la gráfica de Sadik Toksöz

(ref. 9 - pág. 193).

$$\alpha = \frac{h}{P} \left(\frac{k}{v} - 1 \right) = 16$$

si se escoge $r = .10$ m. (radio del dren).

$$\frac{p}{2r} = 60 \quad \text{entonces } E = 46.5 \text{ m.}$$

d) Método de U.S.B.R.

De la ref. 9 pág. 165 .

Para $d' = 3.96$ m. y $E = 60$ m.

Al cabo de 3 días y suponiendo que el nivel freático estaba hasta la superficie:

$$n = .36 \text{ m.}$$

Para $d' = 3.66$ m. y $E = 46$ m.

Al cabo de 3 días y suponiendo que el nivel freático estaba hasta la superficie:

$$n = 0.64 \text{ m.}$$

e) Método de Diferencias Finitas.

Con el programa anexo:

a 3 días y $E = 60$ m. - $n = 0.41$

a 3 días y $E = 46$ m. - $n = 0.67$

Caso 2 :

Se tiene un suelo con una permeabilidad $k = 1.2$ m/día, la conductividad específica $s = 0.15$. Se instalarán los drenes a una profundidad de $H = 1.25$ m., el espaciamiento será de 46 m. La capa impermeable se encuentra a 11.25 m. o sea $p = 10$ m. La política será mantener el nivel freático a una profundidad $n = .65$ m.

Se pregunta ¿A qué condiciones de lluvia corresponde y que gasto se sacará con la altura crítica?

a) Método Racional.

$$\text{si } E=46\text{m.} \quad E^2 = \frac{4 k_s h^2}{q_c} + \frac{8 k_f \ell h}{q_c} \quad \text{con } k_s = k_f \quad \ell = 3.18$$

$$q_c = 1.1 \text{ l/ Ha-seg}$$

$$\text{por lo que } v = 0.57 \text{ mm/h}$$

$$\text{Cálculo del gasto } Q = \frac{kh^3}{E} = .009 \frac{\text{m}^3}{\text{m} - \text{día}}$$

b) Ecuación de la Elipse.

La profundidad equivalente $d' = 4.27$ m.

De la gráfica ya mencionada con -----

$$s/h = 76.67 \text{ y } k/v = 1700$$

$$v = .005 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$$

c) Fórmula de Kirkham.

Si suponemos un radio $r = .1$ m. para el de los drenes y con $\frac{E}{P} = 4.6$ de la gráfica correspondiente -

$$v = .006 \frac{m}{h}$$

d) Método del U.S.B.R.

Si consideramos que en 4 días debe bajar el nivel hasta:

$$n = 0.6 \text{ m.}$$

$$\text{Si } D = 4.9 \text{ m.}$$

$$h = .675 \text{ a los 4 días.}$$

Cálculo de gastos: $q = \frac{2.11 k h_0 D}{E} .48 \frac{m}{m-día}$ si $h_0 = 0.6$ m

e) Método de Diferencias Finitas.

Según el programa en 4 días:

$$h = 0.707 \text{ y } q = 0.57 \frac{m}{m-día}$$

COMENTARIOS A LOS RESULTADOS ANTERIORES.

Se nota que los resultados se pueden agrupar en tres partes:

1o.- Método Racional.

2o.- Método de la elipse y fórmula de ----

Kirkham.

30.- Método del U.S.B.R. y de Diferencias finitas.

Esta clasificación se ha hecho debido a que los resultados dentro de cada grupo no difieren mucho.

En el primer caso los resultados son evidentes, puesto que el método racional dice que se necesita $E = 60$ m. en tanto que el de la elipse y Kirkham dan $E = 46$ y 46.5 respectivamente. Los métodos de flujo transitorio indican que en 3 días y con 46 m. se abatiría considerablemente el nivel (0.64 - 0.67).

En el segundo caso las diferencias se muestran más claras:

Método Racional $v = 0.57$ mm/h

Método de la Elipse $v = .005$ mm/h

Fórmula de Kirkham $v = .006$ mm/h

Método del U.S.B.R. $n = .60$ en 4 días.

Método de Diferencias finitas $n = .54$ en 4 días.

Es evidente que la comparación entre los grupos 1 y 2 se puede hacer directamente, ya que tienen el mismo parámetro de comparación (e. g. la velocidad de lluvia v). Pero el tercer grupo se puede comparar sólo indirectamente. Algo muy notable es la comparación de gastos, pues mientras en el grupo 1 se tiene $q = 0.009$ m³/m - día; el grupo 3 dice que en promedio

$q = 0.48 \text{ m}^3/\text{m} - \text{día}$, y el grupo 2 quedaría más cercano al primer grupo. De esto se desprende que los resultados por grupos son muy diferentes, tanto en espaciamientos como en gastos.

CONCLUSION.

Existe una gran diferencia en los resultados obtenidos por cada método, y no es fácil determinar cual es más representativo, o bajo que condiciones pueden ser aplicados cada uno. Por lo que sólo la medición directa en el campo definirá cual es la realidad.

MODELO FÍSICO PARA REPRESENTAR EL ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO POR UN SISTEMA DE DRENES PARALELOS.

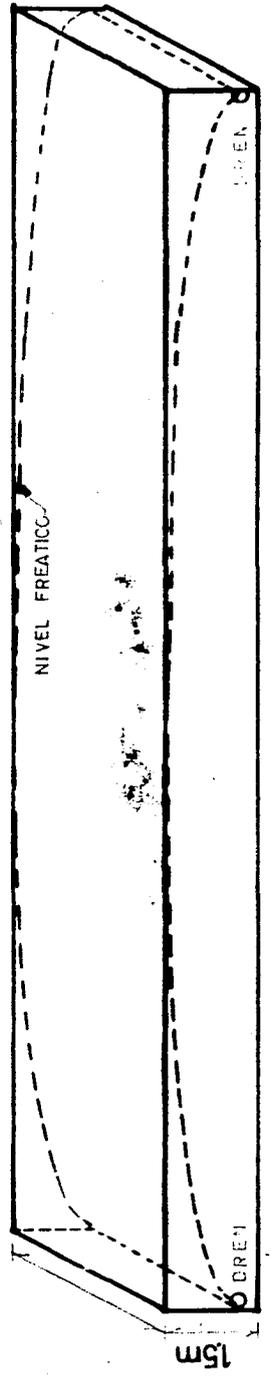
De la conclusión anterior se hace necesario hacer un modelo físico que a nivel de laboratorio pueda dar la información necesaria para establecer la validez de los diferentes métodos.

En el Instituto de Ingeniería se ha empezado a construir un dispositivo con las siguientes características:

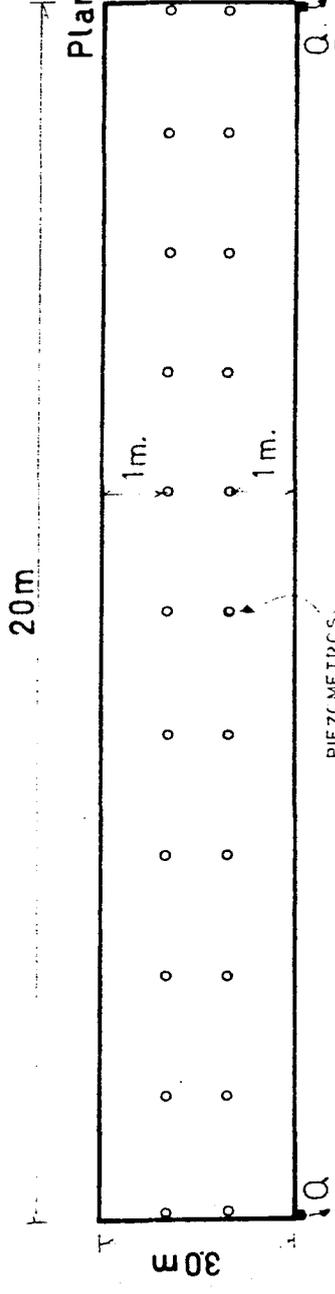
Es un cajón de mampostería de dimensiones mostradas en la figura No. 2. Su longitud es de 20 m. y el ancho de 3 m. La profundidad será de 1.5 m. La permeabilidad del material de relleno será determinada en el laboratorio.

Los drenes serán tubería de 5 cm. de diámetro, perforados y descargan libremente. Se instalarán piezómetros a

Perspectiva.



Planta.



Perfil.



FIGURA 2

cada 2 m. en la forma mostrada en la figura No. 2 .

Un ensayo en este modelo consistirá en saturar hasta la superficie el terreno, registrar por medio de los piezó-- metros el descenso del agua, y también los gastos de los drenes a medida que transcurre el tiempo. De este modo obtendríamos respues-- ta a muchas interrogantes como son: ¿Es el nivel freático en forma de una parábola de 4o. grado? ¿Existe un momento en que el nivel freático varíe poco con respecto al tiempo y se pueda considerar -- estacionario? ¿Cómo se abate el nivel freático? Si en lugar de drenaje por tubos se hace por zanjas ¿Se alteran los resultados? -- y ¿Qué gastos se obtienen por los drenes? .

Otros tipos de ensayo serían variar la profun-- didad de los drenes, cambiar los diámetros de los tubos o la profun-- didad de las zanjas, verificar como se efectúa la recarga del nivel freático, etc.

CAPITULO IV .

METODO DE SOLUCION PARA EL PROBLEMA DE FLUJO TRANSITORIO.

Según se vió en los capítulos anteriores - la solución de un problema de drenaje considerando un estado - de flujo permanente o estacionario, muy rara vez se acerca a - la realidad, y en todo caso ésto es más aplicable a zonas húme - das, donde se puede suponer una aportación constante de lluvia, y por lo tanto condiciones establecidas. Pero en general los - problemas reales son un estado de flujo transitorio y éste se - presenta más frecuentemente en áreas áridas, que necesitan --- riego.

De lo anterior se deriva la importancia de encontrar métodos que resuelvan el problema de estado transito- rio, ya que las soluciones hasta ahora existentes son limitadas, o de una utilización casi prohibitiva, debido a su complejidad, motivo por el cual se presenta en éste capítulo una solución -- bastante simple, que puede ser utilizada por un proyectista en poco tiempo si dispone de acceso a una computadora de regular - capacidad, y que le dará resultados versátiles que otros méto-- dos.

Fórmula del U.S.B.R.

Muchos diseñadores de sistemas de drenaje - han pensado que las fórmulas que describen el nivel crítico en equilibrio con la lluvia, o el riego, no está de acuerdo con --

la situación en el campo donde el nivel freático está constantemente moviéndose en el suelo. Los investigadores de esta oficina pensaron que una ecuación que describiera el movimiento del nivel freático a través del suelo, proporcionaría un método más exacto para el diseño. El movimiento del nivel freático es un fenómeno transitorio, donde la carga hidráulica en cualquier punto en el suelo no es constante; está cambiando con el tiempo. Entonces, el fenómeno es denominado "en estado transitorio" y su caso opuesto que veíamos en anteriores capítulos es el "estado estático o permanente" en el cual la carga hidráulica no varía en el tiempo.

Los líderes en el estudio de los problemas en estado transitorio han sido U.S.B.R. y en particular R. D. - Glover y otros miembros de esta oficina.

La fórmula obtenida y desarrollada por Glover es la siguiente:

$$\frac{k D}{s} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

k = Conductividad hidráulica.

D = Promedio de profundidades del nivel freático.

s = Conductividad específica.

h = Elevación de agua sobre un plano de referencia.

Esta es la solución que debe ser usada, -- para el caso de flujo en estado transitorio.

Es conveniente hacer notar que la ecuación es idéntica a la del calor. Los métodos para resolver la ecuación del calor son ampliamente discutidos en Carslaw y Jaeger (Conduction of Heat in Solids) Oxford Press, 1959. Los métodos usados por ellos pueden ser igualmente buenos para el problema del nivel freático en estado transitorio.

Una solución a la ecuación para el drenaje de un terreno por drenes sub-superficiales paralelos ha sido hecha por Glover y sus asociados. Las primeras soluciones que fueron obtenidas, suponen que el nivel freático es inicialmente plano y paralelo con la superficie del terreno. Posteriores soluciones fueron obtenidas suponiendo otras formas de nivel freático. La solución más recomendada es la presentada por el U.S.B.R. pues está basada en una suposición que consiste en considerar que el nivel freático tiene inicialmente la forma que corresponde a una parábola de cuarto grado.

En el tiempo $t = 0$ el nivel freático tiene la forma dada por la ecuación:

$$h = \frac{8h_0}{E^4} \left(E^3 x - 3 E^2 x^2 - 4 E x^3 - 2 x^4 \right)$$

Con las restricciones:

Si $t = 0$ entonces para $y = 0$,

$$x = 0 \quad \text{ó} \quad x = L$$

Donde E es la distancia entre los drenes.

La solución a la ecuación general con estas condiciones iniciales es:

$$h = \frac{192 h_0}{\pi^5} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(2m+1)^2 \pi^2 - 6}{(2m+1)^5} \exp \left(- \frac{(2m+1)^2 \pi^2 \alpha t}{E^2} \right) \operatorname{sen} \frac{(2m+1) \pi x}{E}$$

Donde: $\alpha = k/S$

k , D , s , tienen el significado ya visto.

E = Espaciamiento entre los drenes.

h_0 = Altura del nivel freático en el punto medio entre los drenes.

Puesto que el principal interés está en la altura del nivel freático en el punto medio entre los drenes, se puede obtener la siguiente expresión para $x = E/2$

$$h = \frac{192}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (-1)^{(n-1)/2} \frac{n^2 - 6/\pi^2}{E^5} \exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{E^2} \right)$$

Una solución aproximada puede ser obtenida tomando sólo el primer término de la serie.

Existen dos gráficas que resuelven la ecuación para el punto medio entre los drenes, una cuando están apoyados en la capa impermeable, y otra cuando existe una distancia "a" de separación entre ellos. Esta solución es más accesible y útil para resolver el problema de estado transitorio, en vista de lo cual más adelante se presentará otra forma de solución a la ecuación original que si bien es un poco más compleja es también más versátil.

EL USO DE LA ECUACION DEL U.S.B.R.

El valor de D para ser usado en la fórmula.

En la fórmula desarrollada por el U.S.B.R.,

D representa el promedio de espesor de el agua que transmite a los drenes. Para el caso de flujo transitorio la caída del nivel freático no es constante, varía con la pendiente y la posición del nivel freático. En adición el valor de D no refleja exactamente la forma en que el nivel baja al dren. Se va primero a considerar el flujo a través de la región bajo los drenes. En esta región las líneas de flujo difieren de las líneas rectas que suponen las hipótesis D-F, siendo su verdadera forma curvas. Hooghoudt tomó la naturaleza radial del flujo bajo los drenes, en consideración para resolver la ecuación de Laplace para este tipo de flujo. Como resultado él obtuvo un factor de corrección, o mejor dicho, una serie de distancias equivalentes que pueden ser substituidas por la actual distancia del dren a la capa impermeable.

Primero hace una estimación del espaciamiento de los drenes. Las gráficas de Hooghoudt son usadas para determinar la profundidad equivalente. Entonces los nuevos valores para la profundidad equivalente son substituidos en la fórmula del U.S.B.R. para calcular el espaciamiento correcto de los drenes. Si el espaciamiento calculado de los drenes difiere mucho del espaciamiento supuesto, un nuevo valor para la pro

fundidad equivalente es obtenido de las gráficas y se repite - el cálculo. Usualmente es necesario repetir los cálculos solamente una vez para obtener el valor satisfactorio de la profundidad equivalente.

Un factor importante a determinar es D que es la suma de longitudes de la capa impermeable a los drenes, más el promedio de variación del nivel freático sobre la línea que une los drenes. Como antes se vió la primera parte es d' , o sea, la profundidad equivalente del dren a la barrera, obtenida por las gráficas de Hooghoudt; la segunda parte se puede obtener mediante una tosca aproximación que puede ser el cociente de dividir la altura del nivel freático sobre el dren, medida - en el punto medio, entre dos. Con esto obtenemos para la capa total que transmite agua la ecuación:

$$D = d' + h_0 / 2$$

APLICACION DE LA FORMULA EN AREAS IRRIGADAS.

Un estudio de los hidrógrafos de el agua en - el suelo muestra como el nivel freático varía durante las estaciones de riego.

En general el nivel freático es más bajo al - comienzo de la estación de riego y más alto al final. Los puntos más altos son alcanzados inmediatamente después de un riego, pero en general tienden hacia arriba durante toda la estación. Durante la estación de no riego el nivel freático baja y luego vuelve

a subir en el siguiente riego. Si la caída del nivel freático durante la estación de no riego no es igual a la ascensión neta durante la estación de riego, el nivel freático tenderá a subir a través de los años. Si el suelo va a ser drenado adecuadamente esta ascensión será prevenida.

La descarga anual de áreas irrigadas deben ser iguales o más grandes que la recarga si el nivel freático va a ser mantenido a niveles razonables. Cuando la recarga -- anual es aproximadamente igual a la descarga, entonces las -- fluctuaciones anuales del nivel freático serán razonablemente constantes año con año.

El U.S.B.R. en su ecuación hace un esfuerzo para tomar en cuenta la variación del régimen de descarga y carga del agua en el suelo. La meta de su análisis es obtener un espaciamiento de drenes con el que se obtenga un equilibrio dinámico con un nivel freático pre-establecido para un suelo determinado, riego, cultivo y características climatológicas del área.

Para realizar el análisis es necesario conocer las necesidades de uso consuntivo, las prácticas de cultivo, y los horarios de irrigación, así como las cantidades.

El U.S.B.R. usa el concepto de "Conductividad Específica". Todos los suelos sobre el nivel freático se supone que son drenados de igual forma, independientemente de su contenido de humedad inicial. Este concepto se puede --

definir como el volumen de agua (expresado como un porcentaje - del volumen total) que se drenará libremente de un suelo saturado. La conductividad específica es siempre menor que la porosidad ya que una parte del agua será retenida en el suelo por --- fuerzas moleculares o capilares (15). Como la suposición no es totalmente verdadera, pero sí es una aproximación de los verdaderos contenidos de humedad, se puede aceptar como una verdad. Una relación entre conductividad específica y conductividad --- hidráulica ha sido desarrollada por Talsma y Haskeew y extendida por el U.S.B.R. para una gran cantidad de suelos. La relación no debe ser vista como única, puesto que solamente es válida para los suelos que fueron observados.

Hay una cierta racionalidad respecto de --- esta relación. La conductividad específica es una medida del tamaño y de la distribución de los poros en el suelo. Debe por lo tanto esperarse que exista una correlación entre la distribución del tamaño de los poros y la conductividad hidráulica. -- Aunque sí bien la relación nunca puede ser mejor que una aproximación, ésta puede estar dentro de la desviación que se espera de las medidas de campo de la conductividad hidráulica.

La relación usada por el U.S.B.R. para estimar la conductividad específica de la conductividad hidráulica se puede encontrar en la referencia 8. Para usar esta figura se debe tener en mente que el valor de la conductividad específica pertenece solamente a la capa de suelo que está siendo drenada. Es necesario que las medidas de permeabilidad las dé ---

esta capa. Los cálculos son comenzados con la altura máxima - que el nivel freático alcanzará. Esto ocurrirá al final de la estación de riego después del último. Es necesario calcular - la profundidad promedio del flujo para la altura máxima que el nivel freático alcanzará. Primero es necesario suponer un valor de E , la distancia entre los drenes. Entonces los valores de k , t , s , que han sido medidos o calculados se utilizan para seguir las fluctuaciones del nivel freático para el espaciamiento supuesto.

Es posible calcular la caída del nivel - freático durante el intervalo de tiempo t supuesto. Después - de cada recarga, la caída es calculada y al final de la esta- ción el nivel freático debería estar en la misma posición o - más abajo que al comienzo de los cálculos. Si el nivel freá- tico es alto el espaciamiento de los drenes debe ser alterado y los cálculos repetidos hasta que se obtenga el espaciamiento apropiado. Usualmente sólo dos intentos son los requeridos -- para estimar el espaciamiento apropiado.

Cálculo de la descarga de los drenes usando la fórmula del U.S.B.R.

La fórmula de la descarga de los drenes para un dren colocado sobre la capa impermeable es:

$$q = \frac{4 k h^2}{E}$$

Donde: •

q = descarga en m^3/m - día y D y E tienen -

el mismo significado del espaciamiento de drenes.

La fórmula de descarga para drenes paralelos a una distancia d sobre la capa impermeable es:

$$q = \frac{2 \pi K h_o D}{E}$$

METODO DE DIFERENCIAS FINITAS.

Explicado ya un procedimiento se presenta -- ahora otra solución a la ecuación original por el método de dife rencias finitas. Utilizando el método explícito de solución se tiene:

$$\frac{KD}{s} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial h}{\partial t}$$

entonces

$$K^* = \frac{K D}{s} \quad K^* \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial h}{\partial t}$$

sea nuestro problema el mostrado en la figura 3 .

En el eje x se representarán los incrementos en que ha sido dividido el espaciamiento, o sea $\Delta x = E - 2\Delta x$. En el eje h se tienen las alturas del nivel freático, recordando que -- la forma inicial es una parábola de 4o. grado.

Se llamará h_c^A a la altura del nivel freático de un punto cualquiera en un intervalo de tiempo dado, y -- h_c^D el nivel del mismo punto en un instante después, sabiendo -- que h_i^D y h_d^D son las alturas a la izquierda y derecha del -- punto h_c^D en el instante después. Habiendo establecido lo anterior, se puede construir una malla como la mostrada en la figura No. 4 .

En este esquema el eje x tiene el significa-

do de la figura anterior, y t será el eje que represente los intervalos de tiempo a través del cual se analiza el fenómeno de drenaje.

El esquema explícito de diferencias finitas sería:

$$K^* \left(\frac{h_D^D + h_1^D - 2h_C^D}{\Delta x^2} \right) = \frac{h_C^D - h_C^A}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta t K^*}{\Delta x^2} (h_D^D + h_1^D - 2h_C^D) - h_C^D = -h_C^A$$

$$\text{Si: } C = \frac{\Delta t K^*}{\Delta x^2}$$

Entonces:

$$C (h_D^D + h_1^D - 2h_C^D) - h_C^D = -h_C^A$$

$$Ch_D^D + Ch_1^D - 2Ch_C^D - h_C^D = -h_C^A$$

$$\therefore (1 + 2C)h_C^D - Ch_D^D - Ch_1^D = h_C^A$$

Cambiando los sub-índices:

$$(1 + 2C)h_1^D - Ch_2^D - Ch_0^D = h_1^A$$

En el siguiente intervalo:

$$(1 + 2C)h_2^D - Ch_3^D - Ch_1^D = h_2^A$$

$$(1 + 2C)h_3^D - Ch_4^D - Ch_2^D = h_3^A$$

$$(1 + 2C)h_n^D - Ch_{n+1}^D - Ch_{n-1}^D = h_n^A$$

Pero como el esquema es simétrico:

$$h_{n+1}^D = h_{n-1}^D$$

Por lo que:

$$(1 + 2C)h_n^D - Ch_{n-1}^D - Ch_{n-1}^D = h_n^A$$

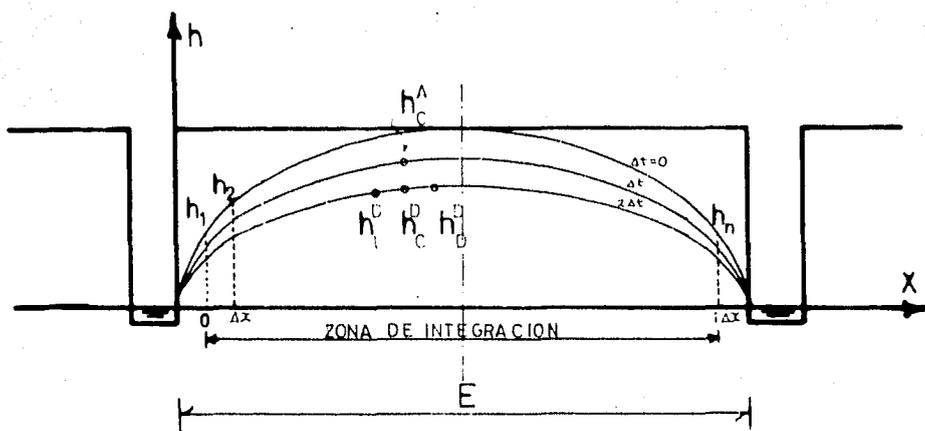


FIGURA 3

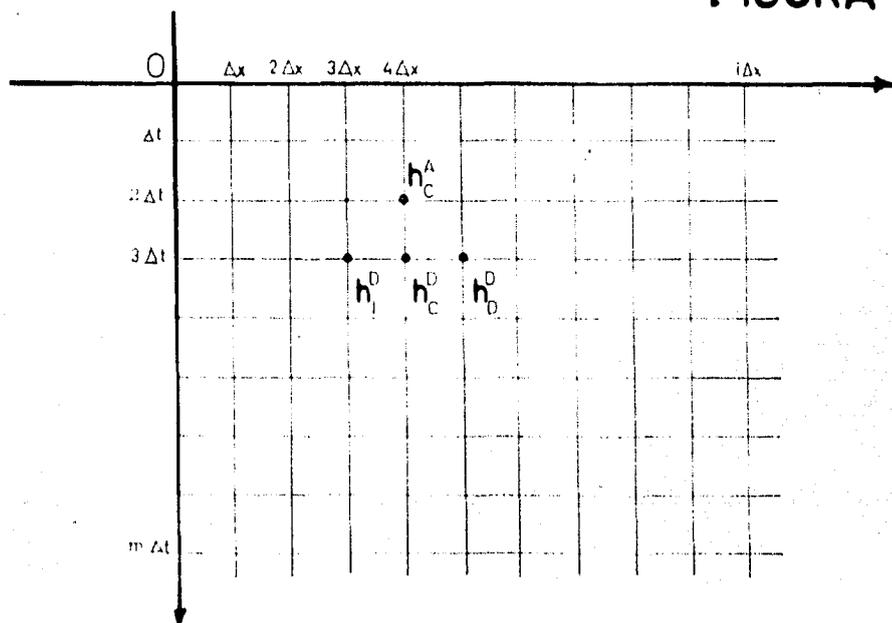


FIGURA 4

Lo anterior forma un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que puede ser resuelto de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} 1+2C & -C & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -C & 1+2C & -C & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -C & 1+2C & -C & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C & 1+2C & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -C & 1+2C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1^D \\ h_2^D \\ h_3^D \\ h_4^D \\ \vdots \\ h_n^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1^A \\ h_2^A \\ h_3^A \\ h_4^A \\ \vdots \\ h_n^A \end{pmatrix}$$

Por comodidad se escribirá:

$$\{C\} \{h^D\} = \{h^A\}$$

Donde $\{C\}$ es la matriz de transformación, que considera las características propias del suelo. El vector $\{h^D\}$ representa la posición del nivel freático en el instante $m\Delta t$ y $\{h^A\}$ en $(m+1)\Delta t$.

Si se llama $\{C^*\} = \{C\}^{-1}$

Entonces: $\{h^D\} = \{C^*\} \{h^A\}$

Desarrollando la operación de matrices.

$$\{h^1\} = \{C^*\} \{h^0\}$$

$$\{h^2\} = \{C^*\} \{h^1\} = \{C^*\}^2 \{h^0\}$$

$$\{h^n\} = \{C^*\}^n \{h^0\}$$

Concluyendo que mediante esta fórmula se puede conocer la posición del nivel freático en cualquier instante deseado.

Es evidente que el vector $\{h^0\}$ es la condición inicial de frontera, o sea el perfil del nivel freático al comienzo de los cálculos, que como ya se vió corresponde al de una parábola de cuarto grado.

En esta formulación n corresponde al número de intervalos de tiempo que se necesiten. Y la restricción a esta formulación está dada en la referencia No. 3 y consiste en que para una relación de:

$$\frac{\delta t}{(\delta x)^2} = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} > 0$$

el método es estable y converge adecuadamente.

La aplicación práctica a este procedimiento se presenta en los siguientes ejemplos:

Ejemplo 1 . Se tiene un sistema de drenaje ya construído de las siguientes características.

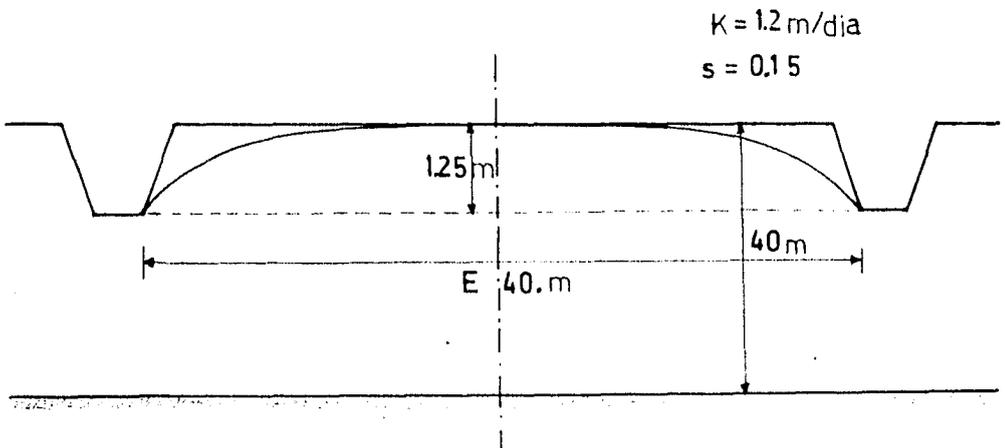


FIGURA 5

Se pregunta: ¿En cuánto tiempo bajará el nivel freático a 65 cm. desde la superficie? y ¿qué volumen se desalojó? .

De las profundidades equivalentes de ---
Hooghoudt (Ref. 4 - pág. 154).

$$d' = 2.755 \text{ m.}$$

La ecuación de la parábola será:

$$h = \frac{8(1.25)}{40^4} \left(40^3 x - (3) 60 x^2 + 60(4)x^3 - 2 x^4 \right)$$

si se divide E en 20 partes $\Delta x = 2 \text{ m.}$ y $\Delta t = 1 \text{ día.}$

Alimentando a una computadora con estos -
datos:

Día	h_0 (mts.)	Q ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{-día}$)
1o.	1.140	0.134
2o.	0.995	0.117
3o.	0.855	0.100
4o.	0.732	0.086
5o.	0.627	0.074

Las tablas muestran el perfil del nivel ---
freático en cada día y el gasto para cada h_0 en el centro.

Según se ve después de 5 días se tiene ---
 $h_0 = 0.63 = 0.6 \text{ m.}$ por lo que la profundidad a que se encuen---

tra medida desde la superficie es $n = 1.25 - 0.6 = 0.65$ que es la profundidad deseada.

Haciendo el promedio de gastos se tendrá que, después de 5 días el volumen desalojado es $0.55 \text{ m}^3/\text{m}$.

Ejemplo 2 .

Se va a abrir una nueva zona de cultivo, se van a instalar drenes enterrados para abatir un nivel freático que se puede presentar hasta la superficie y se necesita que en 3 días esté libre de agua una profundidad de 60 cm.

Se sabe que los drenes serán instalados a 1.50 m. de profundidad que es donde se encuentra una capa impermeable.

Las características del suelo son:

$$k = 1.2 \text{ m/día}$$

$$s = 0.15$$

$$\text{y } d' = 0$$

Se procederá suponiendo un espaciamiento arbitrario de 60 m. por lo que $\Delta x = 3 \text{ m.}$ para una división de 10 intervalos. La ecuación de la parábola será:

$$h = \frac{8(1.5)}{60^4} \left(60^3 x - (60)^2 (3x^2) + 4 (60) x^3 - 2 x^4 \right)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos por el método propuesto $n = 1.5 - 1.465 = 0.035 \text{ m.}$ después de 3 --

días, lo cual es insuficiente.

Si se modifica la longitud a 30 m. y se obtiene $n = 1.500 - 1.209 = 0.291$ m. (no es suficiente).

Si se intenta ahora una longitud de 20 m. y: $n = 1.500 - 0.890 = 0.610$ m. que sí es satisfactoria. Por lo que con un espaciamiento de 20 m. se garantiza que en 3 días queda libre de agua una profundidad de 60 cm. desde la superficie.

PERFILES.

Sí E = 60 m. $\Delta x = 3$ m.					
0	Δx	$4\Delta x$	$8\Delta x$	h_0	Días.
0.000	.422	1.225	1.484	1.494	1
0.000	.366	1.148	1.463	1.428	2
0.000	.328	1.080	1.438	1.465	3
0.000	.300	1.021	1.409	1.444	4

Sí E = 30 m. $\Delta x = 1.5$ m.					
0	Δx	$4\Delta x$	$8\Delta x$	h_0	Días.
0.000	0.327	1.051	1.398	1.427	1
0.000	0.252	0.880	1.278	1.320	2
0.000	0.211	0.763	1.162	1.209	3
0.000	0.184	0.677	1.058	1.106	4

		Si $E = 20 \text{ m.}$ $\Delta x = 1 \text{ m.}$		h_0	
0	Δx	$4 \Delta x$	$8 \Delta x$	$10 \Delta x$	Días.
0.000	0.261	0.881	1.244	1.282	1
0.000	0.183	0.665	1.018	1.061	2
0.000	0.145	0.538	0.850	0.890	3
0.000	0.121	0.453	0.725	0.761	4

Problema 3 .

Se tiene una zona agrícola, que presenta problemas de inundación y se pretende seguir la política de drenar 70 cm. en 4 días, determinar la profundidad y el espaciamiento óptimos para lograrlo.

De las pruebas de campo se sabe que existe - una capa impermeable a 9 m. medidos desde la superficie.

Las características del suelo son:

$$k = 1.2 \text{ m/día}$$

$$s = 0.15$$

si se toman intervalos de 1 día $\Delta t = 1$.

Se supondrá una profundidad inicial de 1 m. a la que se encuentran los drenes, y luego a 2 m.

Las profundidades equivalentes para cada longitud son:

Longitudes	x	d'	d'
		Profundidad equivalente para 1 m.	Profundidad equivalente para 2 m.
20	2	2.44	2.44
40	4	3.66	3.66
60	6	4.58	4.22
80	8	5.19	4.88
100	10	5.49	5.19

Las ecuaciones de las parábolas son:

$$\text{Para } H = 1 \text{ m. } h = \frac{8(1)}{100^4} \left[10^3 x - 3(10)^2 x^2 + 4(10) x^3 - 2x^4 \right]$$

$$\text{Para } H = 2 \text{ m. } h = \frac{8(2)}{10^4} \left[10^3 x - 3(10)^2 x^2 + 4(10) x^3 - 2 x^4 \right]$$

Como el número de intervalos es constante de 10, cada ecuación es válida para todas las longitudes.

Con estos datos y aplicando un programa se obtiene para $H = 1$ m. Las alturas al nivel freático en el centro son:

DIAS	n	ESPACIAMIENTO				
		20 m.	40 m.	60 m.	80 m.	100 m.
	1	.671	0.891	0.955	0.979	0.990
	2	.428	0.757	0.886	0.943	0.971
	3	.276	0.632	0.809	0.898	0.945
	4	0.180	0.525	0.733	0.849	0.916
	5	0.119	0.437	0.661	0.799	0.883

Para $H = 2$ m.

n	ESPACIAMIENTO				
	20 m.	40 m.	60 m.	80 m.	100 m.
1	1.207	1.725	1.895	1.951	1.976
2	0.722	1.415	1.739	1.868	1.932
DIAS 3	0.448	1.149	1.572	1.766	1.873
4	0.286	0.934	1.411	1.658	1.805
5	0.186	0.764	1.264	1.549	1.732

Los anteriores valores se pueden poner en gráficas como las anexas. Y de ahí se concluye que, mientras mayor sea la profundidad de los drenes más espaciamiento se puede dar, por lo que aquí el problema entra en el campo de la economía, ya que habría que calcular costos tanto de profundidad como de longitud; pues por ejemplo: con una profundidad de 2 m. se tiene un espaciamiento de 50 m., mientras que con 1 m. corresponde a 25 m.

Lo que se intentaba con estos ejemplos es demostrar la versatilidad y accesibilidad del método de solución.

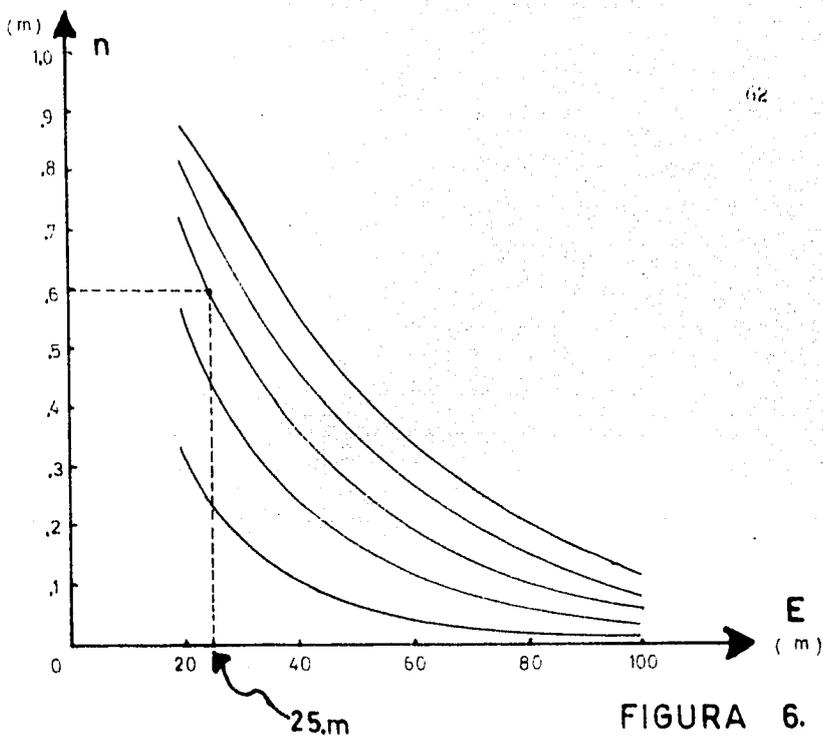


FIGURA 6.

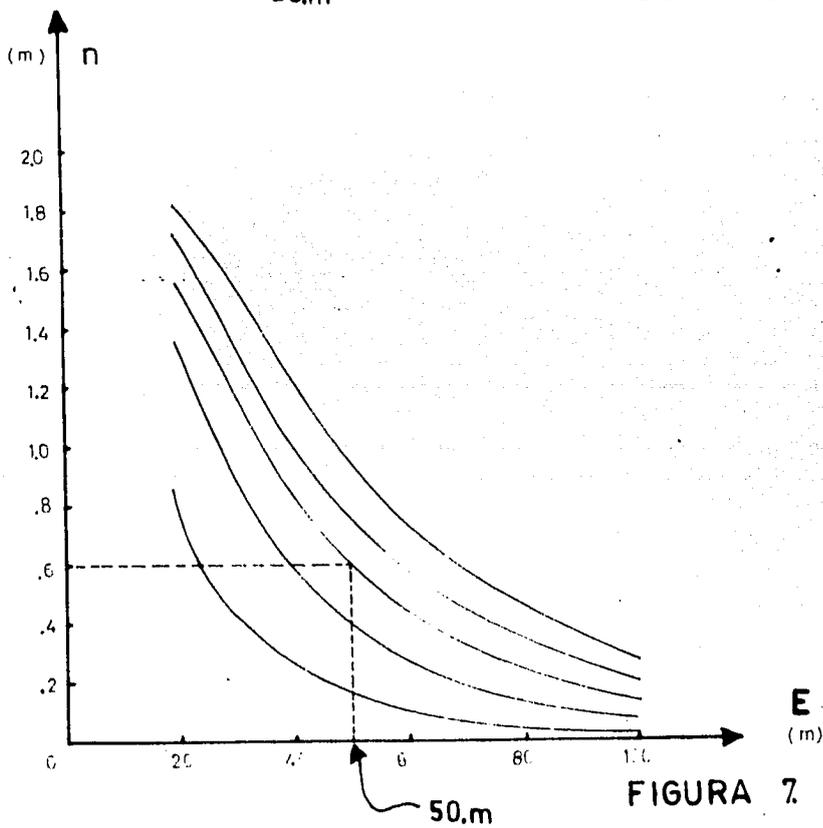


FIGURA 7.

CONCLUSIONES .

Según el desarrollo de este trabajo se ha visto la imperiosa necesidad de mejorar las soluciones ya existentes de los problemas de drenaje. Entre los problemas hidráulicos más importantes se destaca el problema de flujo de agua a través de un suelo en estado transitorio. Dicho en otras palabras, es necesario conocer cómo se abate un nivel freático a través del tiempo con un determinado sistema de drenes. Actualmente ya no se tiene la suficiente precisión a la solución de los problemas de drenaje con los métodos de flujo en estado estacionario, por lo que se hace necesario una herramienta más precisa y versátil que refleje la simulación del drenaje en una forma más real.

Como se vió, existen diferentes métodos para resolver los problemas de drenaje, tanto en estado estacionario como en transitorio. Pero también se encontró que hay una gran discrepancia entre ellos, por lo que es necesario determinar mediante experimentos de campo, cuál es el método más apegado a la realidad.

El método propuesto en este trabajo hace que mediante el uso de una computadora, se pueda obtener una solución más versátil y rápida a los problemas de drenaje.

Como se demostró, el método es convergente y estable, la aproximación o exactitud obtenible es la que permite la capacidad de la máquina. Su aplicación puede hacerse, como se vió en los ejemplos, desde una revisión de un sistema de drenaje ya construido, hasta la simulación en un período de cultivo.

A P E N D I C E .

DATOS SOBRE EL PROGRAMA UTILIZADO.

Una de las ventajas del método de solución -- propuesto, es que para utilizarlo, no se requiere de una computadora de gran capacidad. La computadora utilizada para resolver -- los ejemplos resueltos en el último capítulo es una Hewlett -- Packard modelo 30 con 8k byts de memoria (3808 palabras), con módulo adicional para operaciones con matrices. El lenguaje de la máquina es BASIC y su impresor es térmico de 280 líneas por min.

El programa utilizado es en un 75 % entrada -- de datos y organización de matrices; el otro 25 % corresponde a inversiones y operaciones con ellas, por lo que este programa en una computadora de gran capacidad se reduciría mucho.

Un índice de la exactitud obtenida, se puede -- apreciar con los siguientes resultados:

En el programa utilizado se aprovechó la sime- tría del esquema. Además en lugar de utilizar la fórmula:

$$D = d' + h_0/2$$

se utilizó:

$$D = d' + h'_0$$

donde: h'_0 es el valor real de $\frac{h_0}{2}$ para cada instante.

Ya que en la formulación anterior se utilizaba

$h_0/2$ que es un valor promedio. De modo que en la fórmula:

$$\{h^D\} = \{c^t\} \{h^A\}$$

La matriz $\{c^t\}$ será calculada para cada instante, y multiplicada por el vector $\{h^A\}$ inmediato anterior.

Se pueden hacer algunas modificaciones al programa, con el fin de hacerlo aún más versátil, pero deberán hacerse de acuerdo con el problema específico a resolver.

Una simulación interesante podría ser el analizar un período completo de riego con las recargas de riego y lluvia de acuerdo a una región, pero esto implicaría el salir un poco del propósito de este trabajo.

B I B L I O G R A F I A .

- (1) Saneamiento Agrícola.
Maurice Poirée y Charles Ollier. (1966).
- (2) Drainage of Agricultural Land.
Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture.
(1973).
- (3) Numerical Solution of Partial Differential Equations.
G.D. Smith. (1965).
- (4) Apuntes sobre algunos problemas de drenaje y ensalitra --
miento de tierras agrícolas.
Dr. Oscar Palacios Vélez.
E.N.A. (1969).
- (5) The principles of field drainage.
H.H. Nicholson. (1953).
- (6) Transactions of American Society of Civil Engineers.
Artículo: Problemas de drenaje del valle de San Joaquín.
William L. Berry, E. D. Stetson.
- (7) Soil and water conservation Engineering.
Schwab - Prevert. (1966).

- (8) Drenaje de tierras agrícolas.
Luthin. (1967).
- (9) Drainage Engineering.
James N. Luthin. (1966).
- (10) Open Channel Hydraulics.
Ven Te Chow. (1959).
- (11) Small Dams Desing.
U. S. B. R.

RECOMOCIMIENTOS .

Al Instituto de Ingeniería por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo y - a todos aquellos que mediante un consejo u observación - contribuyeron a concluir esta labor.