



V Seminario Latinoamericano de Irrigación  
III Jornadas Venezolanas de Riego

Caracas, 20 al 31 de Octubre de 1968  
COLEGIO DE INGENIEROS DE VENEZUELA

Tema III  
Doc. N° 19

CRITERIOS PARA ESTIMAR EL ESPACIAMIENTO  
DE DRENAJES EN EL VALLE DE PIURA

Trabajo presentado por:  
Ing. Agr° Abelardo de la Torre V.  
PERU

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

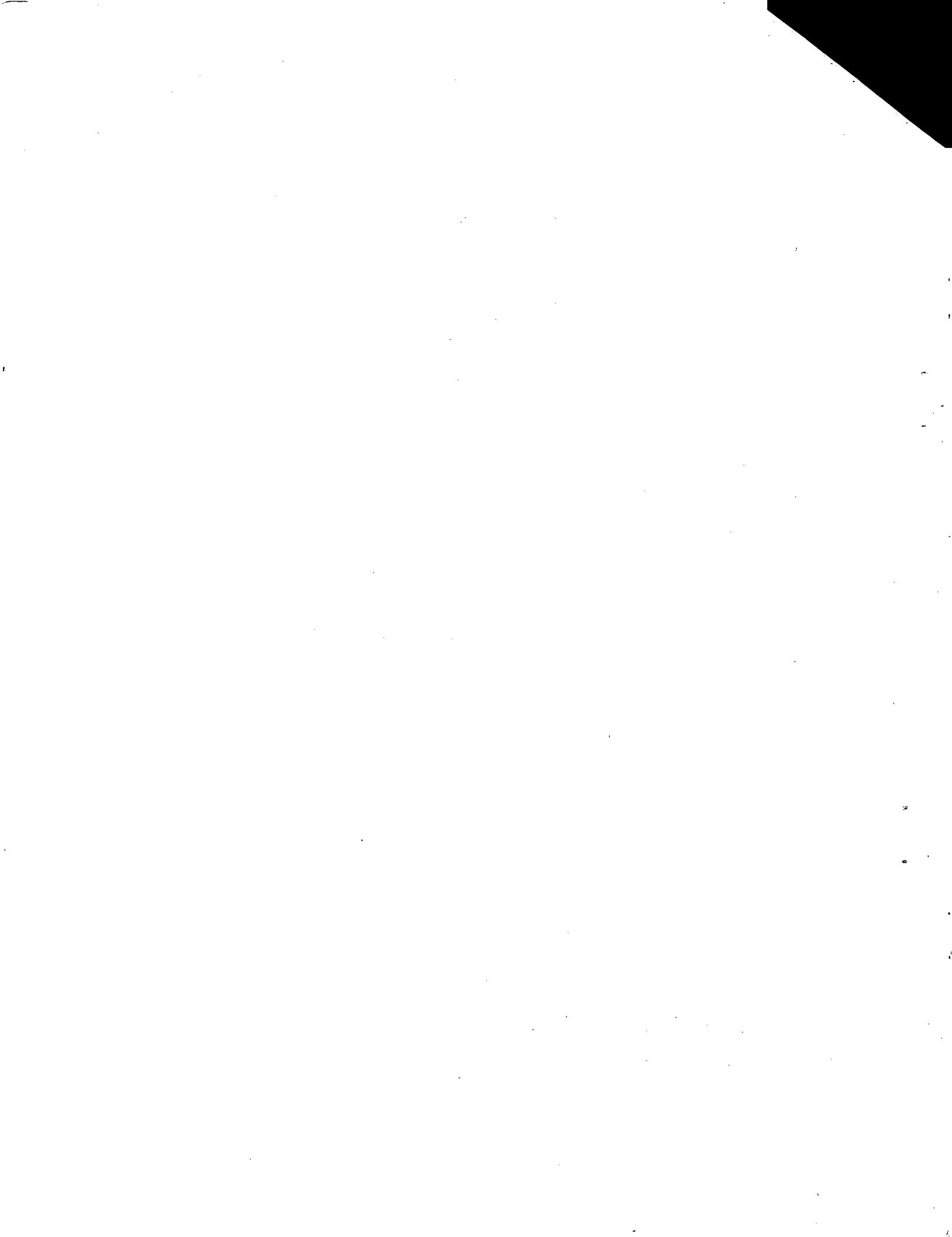
PHYSICS 354

LECTURE 10

CRITERIOS PARA ESTIMAR EL ESPACIAMIENTO DE DRENES  
EN EL VALLE BAJO Y MEDIO DE PIURA \*

\*\* ABELARDO DE LA TORRE V.

\* Trabajo de Tesis presentado para obtener el título de Inge Agrícola.  
\*\* Ing<sup>o</sup> Asistente CENDRET, FIA



## COMPENDIO

El objeto de este estudio ha sido obtener los criterios necesarios para estimar el espaciamiento de drenes de campo en el valle de Piura, con el uso de 3 fórmulas: Donnan, Hooghoudt y Ernst.

Las variables que intervienen en las fórmulas han sido estimadas teniendo en cuenta las recomendaciones de investigadores en drenaje, experiencias en el área y de acuerdo a las características del valle como son: Topografía, Suelos (conductividad hidráulica, salinidad, textura y porosidad efectiva), fluctuaciones de la tabla de agua freática y cultivos de la zona, proporcionados por CENDRET (Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras).

La condición de flujo permanente, que requieren las tres fórmulas utilizadas fue establecido en el valle estimando un coeficiente de drenaje a partir de los requerimientos de lavado de los suelos.

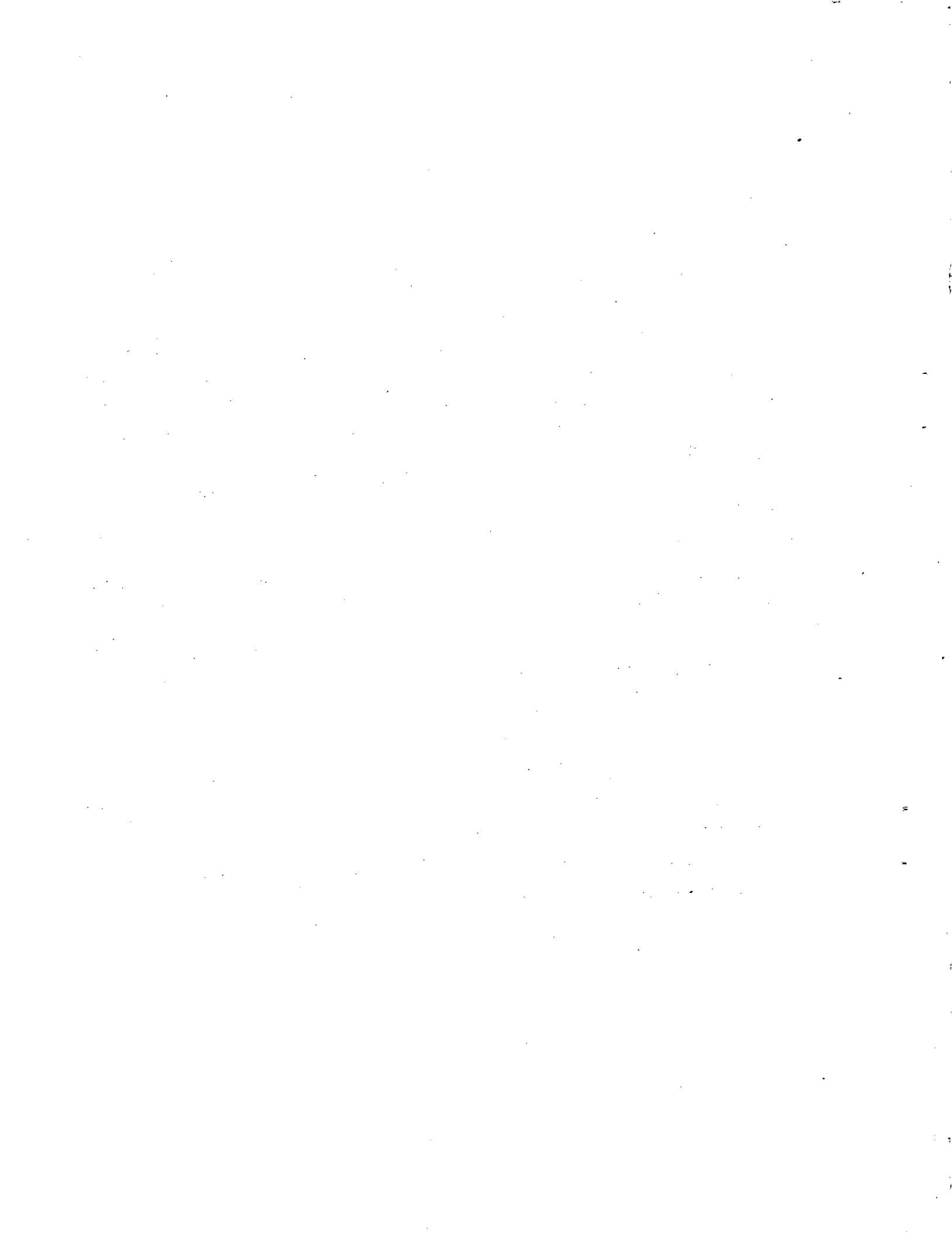
La solución de las fórmulas de Hooghoudt y Ernst fueron programadas en lenguaje Fortran y procesadas en la máquina IEM modelo 1620 de la Universidad Agraria.

Se obtuvieron resultados:

16.7 % del área requiere de espaciamientos entre 30 y 60 m, 54.4 % del área requiere de espaciamientos entre 60 y 120 m y 19.9 % del área espaciamientos entre 120 y 160 m o más.

Además se estimó el costo de la construcción de los drenes de campo y los resultados fueron los siguientes:

100 m de dren abierto ; a mano	10,465	soles
100 m de dren entubado ; a mano	11,065	soles



## SUMMARY

The object of this study has been to obtain the requirements for the estimation of field drain spacings in the Valley of Piura using the three following equations: Donnan, Hooghoudt and Ernst.

The data used in three equations, have been estimated according to the recommendations stated by the authors of the above mentioned formulas and taking into account the main features of the Piura Valley such as Topography Soil properties (Hydraulic Conductivity, Salinity, Texture and Effective Porosity), Water table fluctuations and crops of the area under study.

The condition of steady state flow, assumed in these three equations was worked out for this Valley by estimating a drainage coefficient the upon the leaching requirements of the soil.

The Hooghoudt's and Ernst equations have been programmed in FORTRAN and the available data of the Valley of Piura have been processed according in the IBM 1620 electronic computer of the Agrarian University La Molina.

The analisis of the data resulted is: 16.7 of the area require a drain spacing between 30 m and 60 m; 54.4 % of the area needs a drain spacing between 60 m and 120 m and 19.9 % the area requires a drain spacing between 120 m and 160 m or more.

Moreover an estimation of the costs for installation of field drain has been made giving the following results:

10,465 soles for 100 m of open field drain (hand - made)  
11,065 soles for 100 m of tile drain (hand - made)

1942

## AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su profunda gratitud al Ing° Arturo Cornejo T., Decano de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Patrocinador de la presente Tesis por sus útiles sugerencias y contribuciones al trabajo.

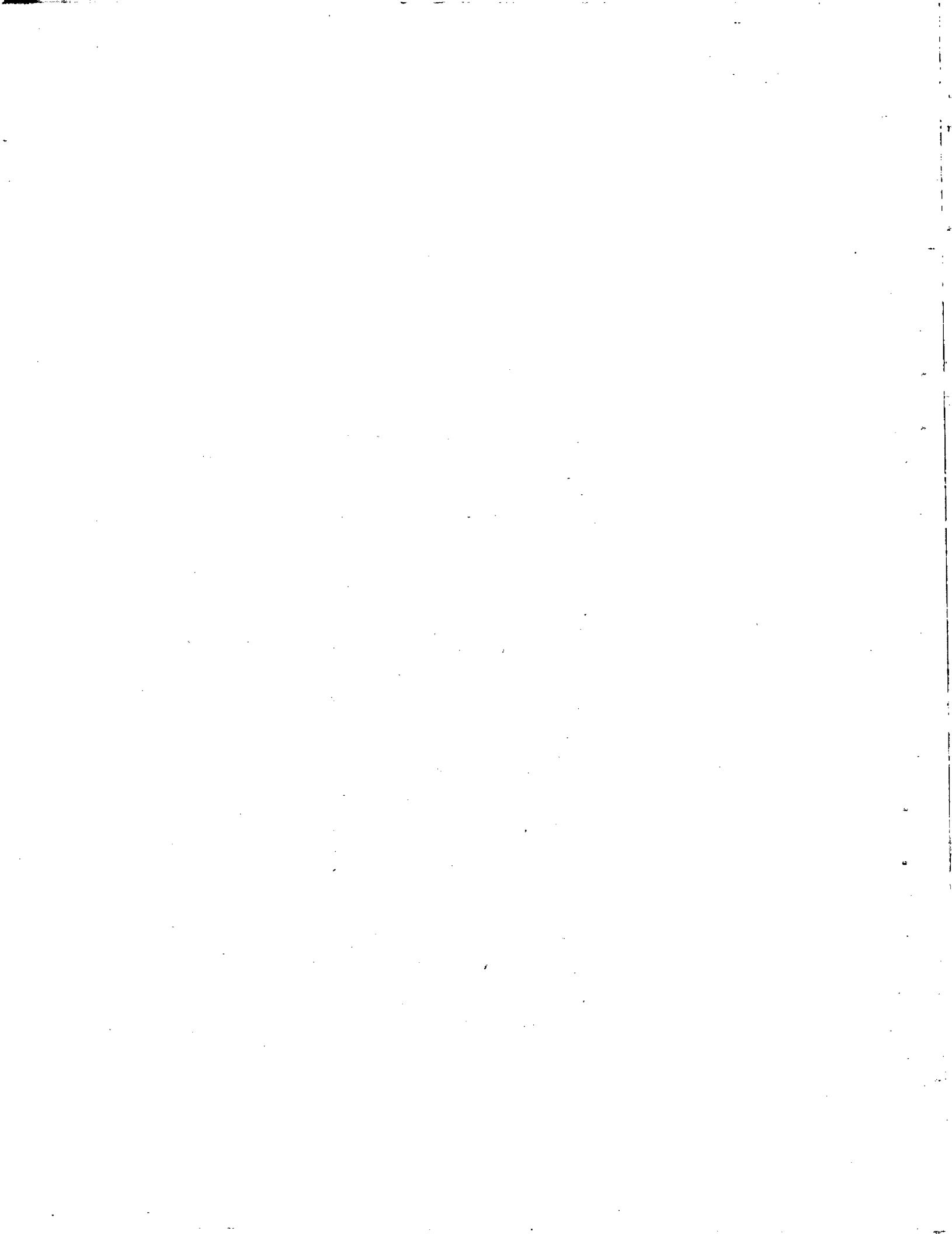
Especial reconocimiento al Ing° Humberto Yap Salinas por su constante ayuda y consejo.

Del mismo modo agradezco a los ingenieros Rodrigo Humberto Pizarro C, Jaime Velasco L. y Julio Lostao E. cuya colaboración y orientación han hecho posible que este trabajo llegue a feliz término.

Aprecio igualmente la cooperación de CENDRET (Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras) cuyos datos referentes a las propiedades hidrodinámicas del valle de Piura fueron analizados en este estudio.

Mis gracias al Ing° Sáenz de DECEE (Dirección de Estadística, Catastro y Estudios Económicos) bajo cuya dirección fueron procesados los datos en la Computadora IBM 1620 y al Sr. Guillermo Vizurraga por el magnífico mecanografiado.

Abelardo De la Torre V.



## 1 INTRODUCCION

### 1.1 Generalidades

La Costa del Perú es una región extremadamente árida donde la agricultura sólo es posible con el auxilio de riego. En los últimos 20 años las regiones áridas se han estudiado en forma especial pues, al igual que los trópicos húmedos, constituyen las reservas más importantes de tierras potencialmente productivas. Hacia estas regiones debe expandirse en el futuro y obtener sus alimentos, la creciente población del mundo. UNESCO tiene entre sus programas más importantes el de zonas áridas y en el mundo existen más de 200 instituciones científicas dedicadas al estudio de los aspectos que son necesarios modificar o adoptar, para convertir a las zonas áridas en lugares habitables por el hombre.

Uno de los problemas más comunes en la agricultura de las regiones áridas es la salinización de los suelos. Este problema se presenta generalmente como una consecuencia del drenaje deficiente de los suelos. La salinización de los suelos de las regiones áridas se conoce desde época muy antigua y existen en la historia de la humanidad, ejemplos dramáticos de valles que han sido asiento de grandes culturas y que en la actualidad son desiertos desolados e improductivos, debido a la salinización de los suelos.

En la Costa del Perú, la salinización de los suelos se presenta en las partes bajas de los conos aluviales y en los sectores de los valles que se encuentran bajo las irrigaciones de las pampas y tablazos adyacentes.

El valle medio y bajo Piura es un caso típico de salinización progresiva de los suelos, favorecidos por un mal drenaje natural, debido principalmente a las características adversas de la zona. El problema no es nuevo y hoy es uno de los principales, quizás el de mayor importancia que

afronta el valle.

En los últimos años el gobierno, en colaboración con los agricultores, ha construido un sistema de drenes troncales o colectores que a pesar de tener defectos de diseño ayuda, en gran parte, a la solución del problema. Afortunadamente, existe de parte de los agricultores un gran interés por resolver el problema. La solución puede ser costosa, sin embargo se ha demostrado en la zona, que los suelos salinos recuperados duplican o triplican sus rendimientos, lo cual justifica la inversión en obras de drenaje. Arribas (1961).

Para recuperar los suelos salinos es importante que se cumplan dos condiciones:

- a) Disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes.
- b) Existencia de un buen sistema de drenaje.

En el valle del bajo Piura la primera condición sólo se cumple en parte. El agua de río es de buena calidad pero la cantidad disponible es insuficiente aún para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. La derivación parcial de las aguas del Chira al Piura -actualmente en estudio- puede resolver este problema de escasez de agua.

Para satisfacer la segunda condición ya se cuenta con los estudios topográficos y de suelo, faltando el diseño del sistema de drenes.

Dentro del diseño del sistema de drenes es muy importante el cálculo del espaciamiento de éstos. Al respecto se conocen varios métodos, unos basados en principios de la dinámica del agua en el suelo y otros basados en experiencias prácticas, siendo también factible la combinación de ellos.

Es necesario comprender que el empleo de las fórmulas de espaciamiento son aproximaciones al valor real y la ciega aplicación de éstos puede conducir a resultados incorrectos; asimismo las variables que intervienen en estas fórmulas deben ser medidas con precisión, para obtener los estimados de espaciamiento con un mayor grado de confianza. La obtención correcta de estas variables depende de:

- a) El conocimiento de las características hidrodinámicas de los suelos

La adopción de criterios uniformes para decidir la magnitud de alguna de estas variables.

Las características hidrodinámicas del valle de Piura han sido estudiadas por el Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras (CENDRET) durante los años 1965 y 1967 y se han publicado bajo el nombre de "Estudio de las características hidrodinámicas del valle de Piura".

## 1.2 Objetivos

El objetivo de esta tesis es obtener criterios para hallar los valores de algunas de las variables que intervienen en las fórmulas para estimar el espaciamiento de drenes -Donnan, Hooghoudt y Ernst- y *señalar* las condiciones para aplicar estas fórmulas.

## 2 REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Criterios de Evaluación de los Elementos de Diseño

La técnica de drenaje aconseja que el primer paso para la solución de un problema de este tipo es determinar la causa del problema, este conocimiento se obtiene en base a la información hidrológica, de suelos, de manejo del agua de riego, de la tabla de agua, etc.

Cada uno de estos factores ha sido revisado para el caso de los estudios de Piura, bajo el nombre de elementos de diseño, que a continuación se trata ampliamente.

2.1.1 Profundidad crítica de drenaje. Ha tomado mucho tiempo reconocer que un factor importante de salinización efectiva del suelo es la profundidad del nivel freático.

Talsma (1963) describe que en la U.S.S.R. se está haciendo una investigación general dirigida a definir y determinar la profundidad crítica del nivel freático-salino y relacionarlo a la profundidad de drenaje. El concepto de profundidad crítica de drenaje fue originalmente propuesto por Polinov (1930)<sup>1</sup> quien lo definió como "la máxima profundidad del nivel freático a la cual las sales solubles, en condiciones naturales, pueden ascender por capilaridad o difusión". Pronto fue reconocido que el nivel freático crítico depende de varios factores como son: la concentración de sales en el agua freática, la velocidad de ascenso capilar, el fenómeno de difusión, del lavado de la lluvia, de los riegos y de los cambios operados en el perfil durante la evaporación.

Los primeros trabajos sobre profundidad crítica están basados en ob-

---

<sup>1</sup> Talsma, T. (1963) "The control of saline Groundwater" Laboratory of Physics and Meteorology, Agricultural University, Wageningen, págs. 2-12.

servaciones de campo. Teakle y Burvill (1945)<sup>1</sup> afirman que la salinización de los suelos en el Oeste de Australia, es en general bastante seria donde el nivel freático está a 5 o 6 pies (1.60 - 1.83 m) de profundidad. Kostiakov<sup>1</sup> considera que la profundidad del nivel freático en áreas irrigadas y salinas de la U.S.S.R. debe ser mayor de 1.5 a 2.5 m, la profundidad dentro de estos límites depende del contenido de sales del agua subterránea, de la estructura del suelo y de las prácticas de cultivo, pero que en suelos arcillosos la profundidad del nivel freático debería ser mayor de 2 o 2.5 m y después de ser lavados podría reducirse esta profundidad a 1.3 o 1.8 m, pero por períodos cortos. Experimentos de campo de Sukhachev (1958)<sup>1</sup> en terrenos aluviales de Sokh y Uzbekistan mostraron que la profundidad crítica, relacionada a las prácticas de cultivo, perfil salino y salinidad de la napa freática, variaba de 1.1 a 2.8 m. Los suelos aluviales eran de gran estratificación y ascenso capilar bajo. Para el cultivo del algodón la profundidad crítica variaba entre 1.5 y 1.8 m. y para frutales variaba entre 1.2 y 2.4 m. Legostaev (1958)<sup>1</sup> fundamentó que profundidades mayores a 2 m para algodón en Golodnaya y Uzbekistan, donde los suelos son areno arcillosos con alta capilaridad y buena permeabilidad (0.28 m/día), son adecuadas. Kavaev (1958)<sup>1</sup> informó que tanto en lisímetros como en campos de algodón, la concentración de sal aumentaba cuando el nivel freático se hallaba a 1 m de profundidad y concluye, después de analizar una serie de datos, que la profundidad crítica del nivel freático salino podía ser tolerable en suelos arcillosos hasta 1.2 y 1.3 m. Talsma concluye diciendo: "esto demuestra que los suelos de textura media son más fácilmente salinizados y se necesita controlar el nivel freático a una profundidad mayor que en casos de suelos arenosos y de alta permeabilidad o de suelos arcillosos y de baja permeabilidad".

Hastings y Hansen (1945)<sup>2</sup> afirman que "a falta de cualquier prueba experimental o criterio basado en conocimientos científicos, el proyectista está forzado a depender de su experiencia práctica que le dice que no debe permitir que el nivel freático llegue a menos de 1.2 m de la superficie, a fin de evitar la acumulación de sales en el perfil".

---

<sup>2</sup> Roe - Ayres (1960) "Drenaje de tierras agrícolas para Ingenieros" Edit. Omega, Barcelona. Cap. 13.

Arribas (1961) recomienda para los suelos del bajo Piura y a fin de evitar la salinización de los suelos todavía no afectados y poder mejorar las ya salinizadas, hacer drenes suficientemente profundos que permitan mantener la tabla de agua a más de 2.0 m de profundidad.

2.1.2 Coefficiente de drenaje. Donnan y Bradshaw (1941-1951) consideran necesario y ventajoso conocer la cantidad de agua que debe drenarse para mantener el balance de sales y bajar la tabla de agua a un nivel seguro. Esta agua a ser drenada depende de una serie de complejas interrelaciones hidrológicas entre el suelo y el agua como por ejemplo precipitación, evapotranspiración, velocidad de infiltración, tipo de cultivo, operaciones culturales, pendiente del terreno, requerimientos de lavado, contenido de sales en el agua de riego, etc.

Kovda y Egorov (1958) recomiendan que en general los requerimientos de drenaje deben incluir la cantidad de agua para el lavado de sales en el suelo. Normalmente en las zonas áridas y semi-áridas la cantidad de lluvia es muy escasa, aún para satisfacer los requerimientos de evapotranspiración, en consecuencia es usual estimar el coeficiente de drenaje en base a los excesos de agua de riego o en base a los requerimientos de lavaje.

Hooghoudt (1940)<sup>3</sup> hizo investigaciones en las áreas irrigadas de Murrumbidgee sobre el valor del coeficiente de drenaje, lo estimó en 0.005 m/día, asumiendo condiciones de flujo permanente, luego dio a conocer que el espaciamiento estimado con este coeficiente de drenaje fue satisfactorio. Dutch<sup>3</sup> publicó que 0.007 m/día era un coeficiente de drenaje adecuado para condiciones similares, aclarando que él había considerado aplicación de riego suplementario a la lluvia considerada por Hooghoudt.

Donnan y Bradshaw (1941 - 1951) informaron que en los estudios de drenaje del valle Imperial de California, podía considerarse como una cantidad adecuada en el diseño de drenaje al 10 % del agua aplicada para el riego.

---

<sup>3</sup> Van Beers (1965) "Some nomographs for the calculation of drain spacings" Wageningen, Págs. 1-30.

Van Beers (1965) escribe El coeficiente de drenaje (q) representa el volumen de agua drenada por unidad de área y en la unidad de tiempo, sus unidades son las correspondientes a volumen/área-tiempo. El mismo coeficiente de drenaje puede ser expresado en cualquiera de las siguientes formas: Ejemplo. Se tienen drenes espaciados 40 m y el coeficiente de drenaje (q) es 0.005 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día.

$$Q = Aq = 40 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-día} = 0.2 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q = (10,000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 0.005 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{-día}) 1000 \text{ lit}/\text{m}^3 / 86,400 \text{ seg}/\text{día}$$

$$Q = \underline{0.58 \text{ lit}/\text{seg-Ha}}$$

En los Estados Unidos el coeficiente de drenaje (q) es estimado a partir de los requerimientos de lavado de los suelos salinos, con la siguiente fórmula:

$$D_{dw} = D_{cw} \left| \frac{C_{iw}}{C_{dw} - C_{iw}} \right| \dots \dots \dots (1)$$

$D_{dw}$  = Lámina total a ser drenada en cada riego para mantener el balance de sales en el suelo (m).

$D_{cw}$  = Lámina de uso consumptivo (m).

$C_{iw}$  = Salinidad del agua de riego (mmhos/cm)

$C_{dw}$  = Calidad del agua de drenaje (mmhos/cm)

Kovda y Egorov (1958) dicen: existen dos períodos básicamente diferentes en lo que se refiere a las funciones del drenaje en los suelos bajo riego, a saber:

- a. Período de mejoramiento (transicional)
- b. Período de explotación (permanente)

Durante cada uno de estos períodos, el trabajo de drenaje es diferente.

Durante el primer período del drenaje es más activo ya que se aplican grandes láminas de agua con la finalidad de lavar los suelos. Este período es bastante largo hasta lograr la desalinización de la zona radicular y el agua freática. Durante el lavado es posible desarrollar cultivos resistentes a la salinidad, pues las sales son progresivamente elimi-

nadas. La total y satisfactoria eliminación de sales no puede lograrse de una sola vez, pero sí mediante una activa desalinización y drenaje por un período de 10 a 12 años y en algunos casos el lavado total se logra a los 20 o 30 años de ininterrumpida irrigación y drenaje.

Durante el segundo período (de explotación) que se inicia después del completo mejoramiento del suelo, el sistema de drenaje va a eliminar los excesos de agua que se apliquen al suelo con la finalidad de mantener el balance de sales en el perfil e impedir la resalinización, cumple además la finalidad de mantener el nivel freático a una profundidad óptima que no represente peligro para el cultivo y mantenga aireada la zona radicular.

2.1.3 Profundidad de estrato impermeable. Van Beers (1965) dice: Excepto en aquellos casos en que el estrato impermeable se presenta razonablemente definido se considera como tal aquél estrato formado por un material de suelo cuya conductividad hidráulica es igual o menor a  $1/10$  de la conductividad hidráulica del suelo adyacente a él. Por lo general es difícil precisar la ubicación de este estrato impermeable pues suele presentarse en forma aislada y no como una unidad continua, esto sucede sobre todo en los suelos estratificados. Debido a esta dificultad en muchos estudios se ha preferido considerar la profundidad del estrato impermeable igual al doble de la profundidad de los drenes. Así por ejemplo, en el diseño del sistema de drenaje del valle Imperial de California, se hicieron una serie de mediciones y no pudiendo precisar una barrera impermeable de importancia, estimaron que esta se encontraba a 4 m en toda el área. La importancia de precisar la ubicación de este estrato impermeable es menor conforme disminuye la conductividad hidráulica de los suelos y por consiguiente, el espaciamiento entre drenes. Es por ello que Blaney, Donnan y Bowen<sup>2</sup>; dicen: Si no se localiza una barrera impermeable de importancia, el diseñador deberá considerar una profundidad igual al duplo de la de los drenes.

2.1.4 Profundidad de los drenes. Roe-Ayres (1960) dice: Es de consideración primordial y de gran importancia la profundidad a la cual deberán ser instalados los drenes laterales, incluso después de haberse obtenido un nivel freático estático entre riegos. La amplitud en que se permita

fluctuar el nivel freático, en el punto medio entre drenes depende de la permeabilidad del suelo y en menor grado del ritmo de consumo de agua por las plantas. La fluctuación raramente será mayor de 30 cm y puede a menudo, bajo las mejores condiciones, ser de 60 a 75 cm cuando las condiciones de suelo limitan el espaciamiento entre drenes a menos de 150 m.

Hamari (1962) dice: Habiendo determinado los límites de fluctuación de la tabla de agua, los tubos de drenaje deberán ser ubicados debajo del mínimo nivel de la tabla de agua.

El espaciamiento de los tubos de drenaje depende de estas profundidades, cuanto más profundos están ellos mayor será su espaciamiento. Sin embargo en la práctica sucede que la permeabilidad de algunos suelos homogéneos disminuye con la profundidad, en consecuencia, la exageración en la profundidad de los tubos puede ubicar a estos en una zona menos permeable, lo cual reduciría el espaciamiento.

El mismo autor en un experimento realizado en el delta del Nilo, con tubos de drenaje enterrados a 1.20; 1.50 y 1.80 m de profundidad, siendo el espaciamiento el mismo en los tres casos, halló que el nivel freático bajó en tiempo muy similar para los tres casos, esto lo atribuyó a la disminución de la permeabilidad con la profundidad. Por otra parte, el incremento de la profundidad de los tubos influye en el costo del sistema. Hamad concluye que para el diseño puede considerarse una pequeña profundidad bajo el mismo nivel de la tabla de agua.

Arribas (1961) dice: Por experiencias en drenaje en la hacienda Cumibira, en la parte media del bajo Piura, se recomienda excavar drenes a profundidades mayores a 2.5 m y no pseudo drenes que lo único que hacen es que perdamos tiempo, dinero y al final el campo.

2.1.5 Porosidad efectiva de drenaje. El volumen de espacio poroso drenable o porosidad efectiva de drenaje, representa el volumen de agua que puede ser drenado de una unidad de volumen de suelo a partir de la saturación hasta un estado no saturado.

El espacio poroso drenable puede ser calculado a partir del perfil de humedad del suelo suponiendo que hay equilibrio entre el nivel freático y el contenido de humedad del suelo sobre este nivel (Fig. 1); la cur-

Tabla 1 Resultados obtenidos en un experimento llevado a cabo en Holanda para determinar la porosidad efectiva de un suelo.

Sitio	Lluvia mm	Profundidad de la tabla de agua en cm llevada:		Espacio poroso	
				real	teórico
I	20.0	De 100	a 58	0.05	0.06
	4.0	89	88	0.07	0.08
	5.1	89	76	0.04	0.08
	4.0	95	87	0.05	0.06
	5.8	87	67	0.03	0.07
II	17.0	177	136	0.04	0.07
	12.0	125	82	0.03	0.09
	3.2	98	93	0.06	0.09
	5.0	100	88	0.04	0.07
	12.0	88	58	0.04	0.07
III	4.2	86	81	0.08	0.08
	6.0	74	59	0.04	0.07
	6.0	50	37	0.05	0.06

( $r_0$ ), cuando se trata de zanjas se puede estimar igual a  $U/2.5$ .

La influencia del valor del perímetro mojado en el espaciamiento de drenes es poco significativo y para probarlo convendría presentar un ejemplo. Empleando la fórmula de Hooghoudt y para  $U = 0.9$  se podría dar un espaciamiento de 220 m y si se asume que  $U = 3$  m, el espaciamiento podría ser 300 m. Este cálculo nos dice que para determinar el espaciamiento de los drenes podemos comenzar suponiendo un valor de perímetro mojado intermedio y si posteriormente se calcula el verdadero valor de  $U$ , en base a la descarga que se produciría hacia los drenes, el cambio que originaría el nuevo valor sobre los espaciamientos no sería significativo.

Hammad (1962) dice: Independientemente de los valores que se obtienen para el perímetro de los drenes, mediante un cálculo rigurosamente hidráulico, no es conveniente usar diámetros menores de 3 pulgadas por las siguientes razones:

- a. La reducción del diámetro de los tubos, va a incrementar el término logarítmico del denominador de la ecuación de espaciamiento de diseño (L). Por ello la economía obtenida por el menor diámetro del tubo, en la práctica se pierde por la reducción del espaciamiento.
- b. Los tubos de diámetro pequeño son fácilmente obstruidos y esto va a aumentar el costo de mantenimiento del sistema.

2.1.7 Espaciamiento de drenes. El cálculo del espaciamiento de drenes depende directamente del valor de la conductividad hidráulica del suelo y, siendo este muy variable de un punto a otro, aún en lugares muy próximos, es necesario dividir el terreno en áreas que tengan determinada amplitud de valores de conductividad hidráulica, lo que dará dos valores extremos de espaciamiento, dentro del cual se escoge el espaciamiento a utilizar en el diseño. Es posible entonces que encontremos áreas con espaciamiento de drenes muy cortos, antieconómico de llevar a la práctica. Estas zonas deberán ser marginadas para tal efecto.

### 3. CARACTERISTICAS DEL VALLE DE PIURA

La agricultura del valle de Piura y en general de la costa peruana, por sus condiciones de clima, vegetación y suelos, corresponde a la de zonas áridas, y para obtener cosechas se necesita del riego.

El método de riego por pozas, la topografía plana, las propiedades físicas y químicas de los suelos, el origen marino de los mismos, la cantidad del agua de riego y la alta evaporación han dado origen a la elevación de la napa freática y a la acumulación de sales en la superficie, agravando los problemas de salinidad y drenaje que, actualmente, limitan el desarrollo agrícola del valle de Piura.

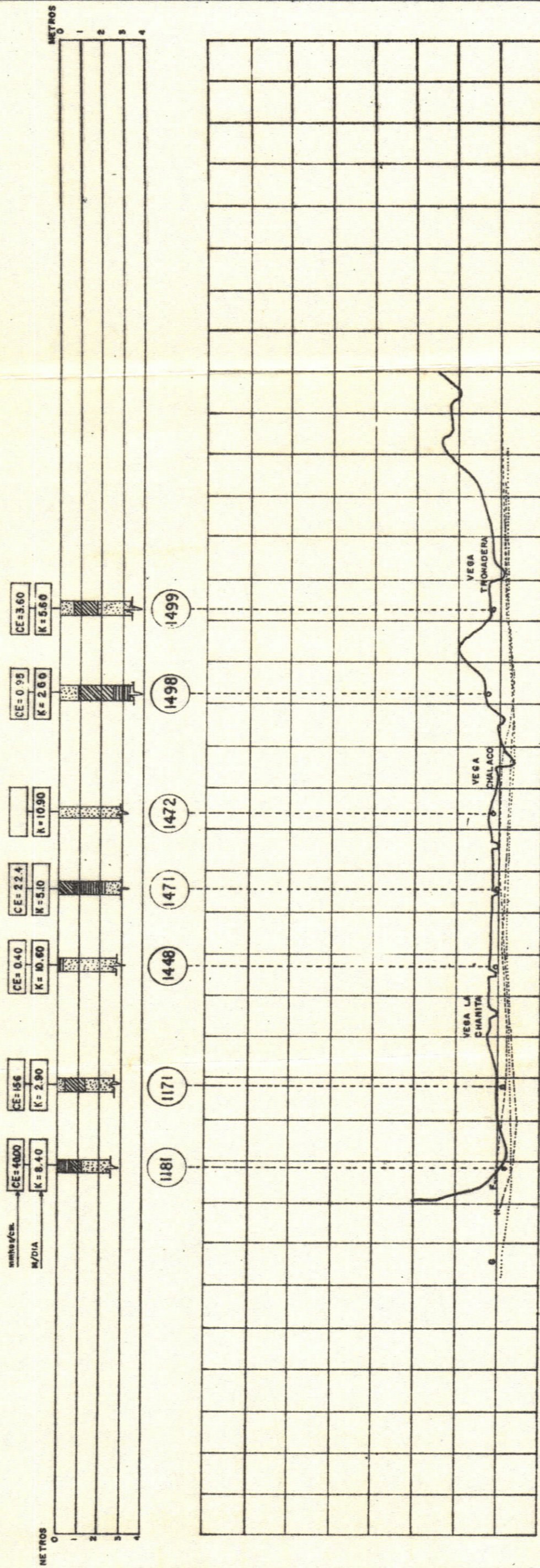
El diseño apropiado del sistema de drenaje para corregir el problema de salinidad requiere del análisis minucioso de las condiciones que influyen en el drenaje y salinidad de los suelos del valle de Piura. A continuación presentamos dicho análisis.

#### 3.1 Características del Perfil de los suelos del valle de Piura

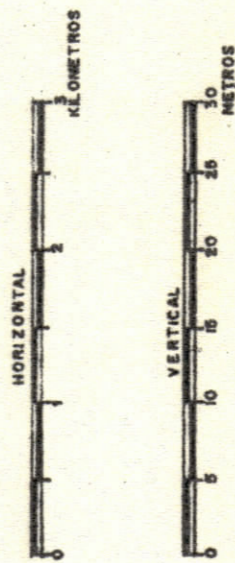
Del análisis de 57 perfiles de pozos profundos del valle Medio y Bajo de Piura, obtenidos de los archivos de la Comisión de Aguas Subterráneas, se puede deducir lo siguiente:

- a) El valle de Piura presenta, por lo general, en la superficie y hasta una profundidad variable entre 2 y 10 m, con mayor frecuencia hasta los 5 m, una capa de suelo de textura media. Esta primera capa, principalmente en la margen derecha del valle, se presenta cubierta por arena eólica, transportada de la orilla del mar.
- b) Bajo esta primera capa, en el 50 % de los casos, se presenta un primer estrato arcilloso que llega hasta los 15 y 20 m de profundidad. Este estrato constituiría la barrera impermeable que interesa para los estudios de espaciamiento de los drenes.

PERFIL TRANSVERSAL  
SECCION A-A'



ESCALA GRAFICA



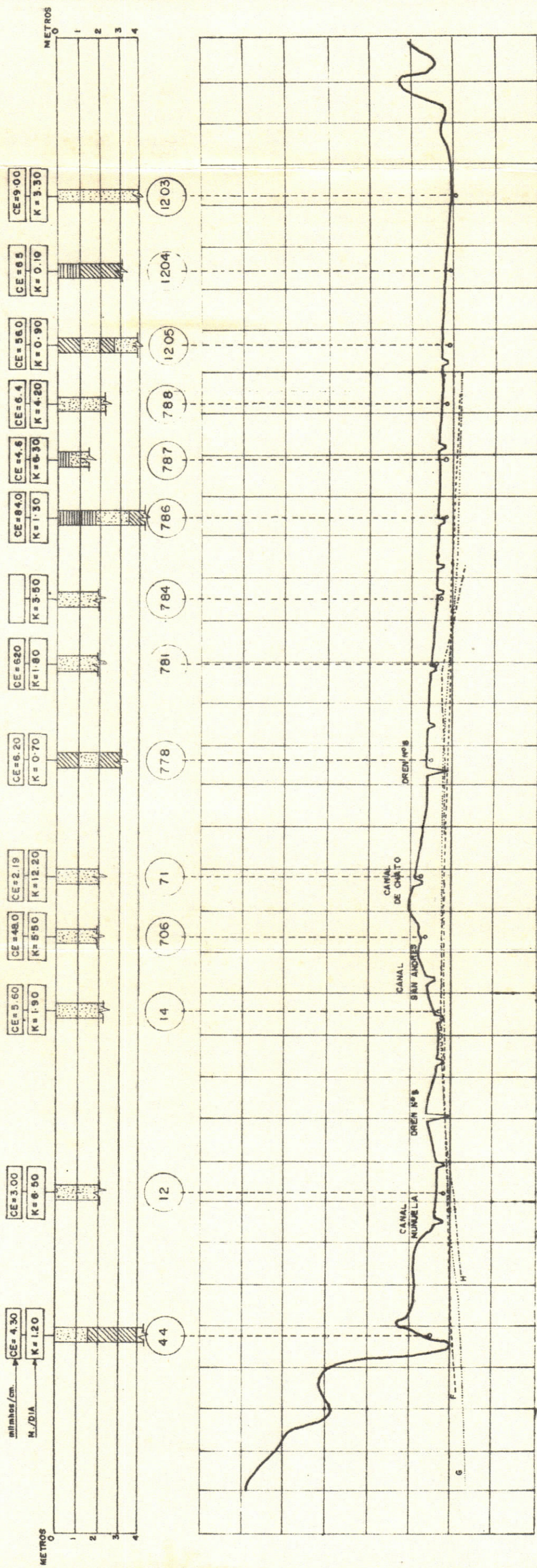
INDICE

6	11
5	10
4	9
3	8
2	7

LEYENDA

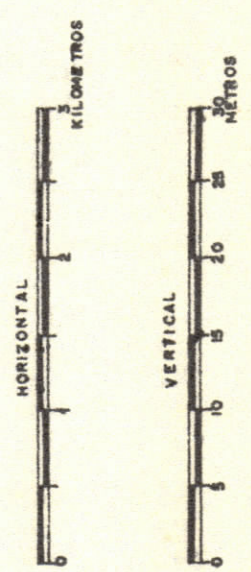


### PERFIL TRANSVERSAL SECCION B-B'

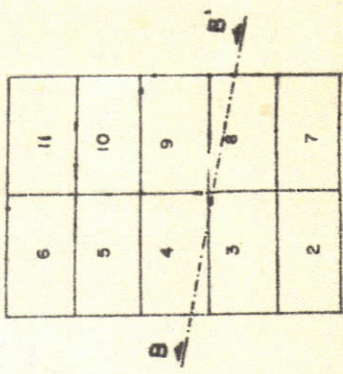


6° LECTURA (MAYO - 1967) - (F)  
 7° LECTURA (JULIO - 1967) - (B)  
 8° LECTURA (AGOSTO - 1967) - (M)

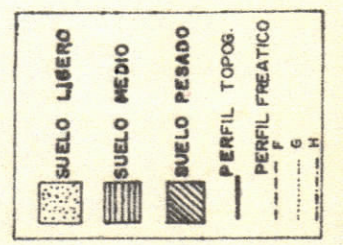
ESCALA GRAFICA



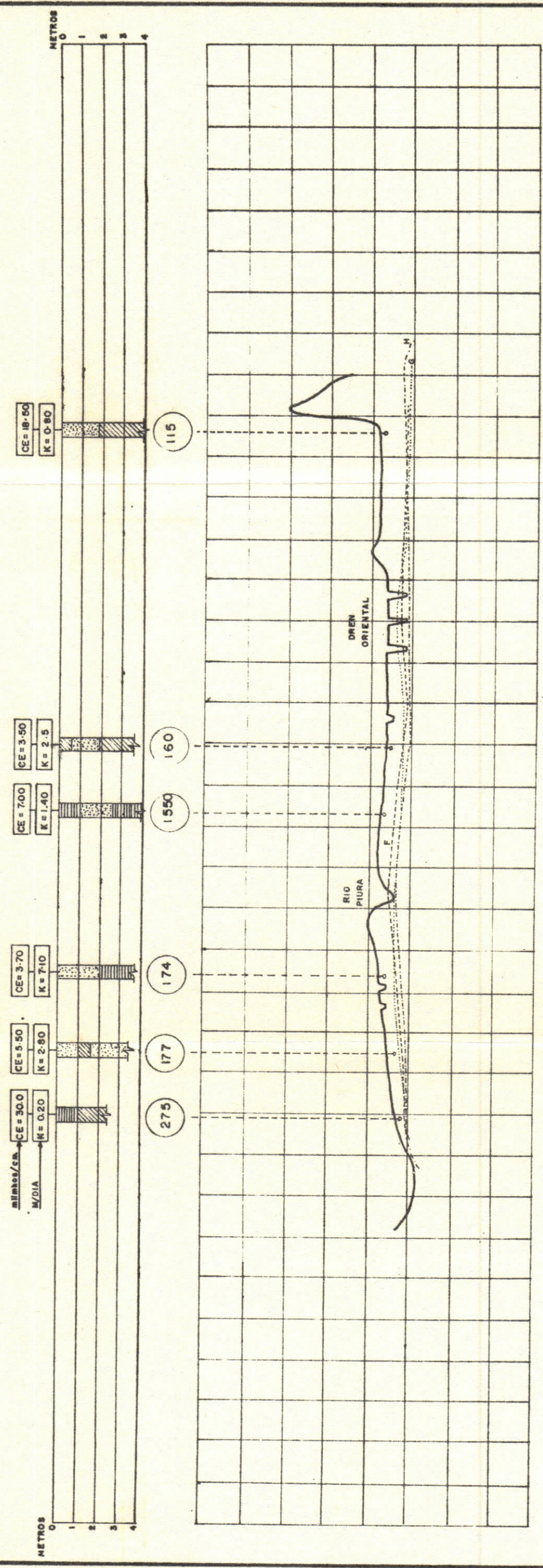
INDICE



LEYENDA

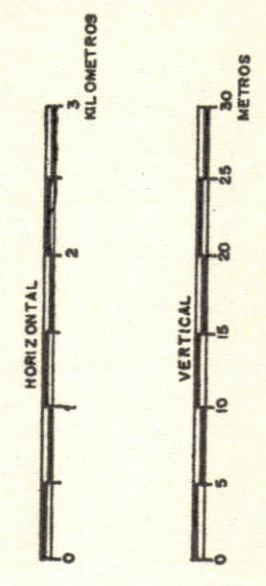


PERFIL TRANSVERSAL  
SECCION C-C'

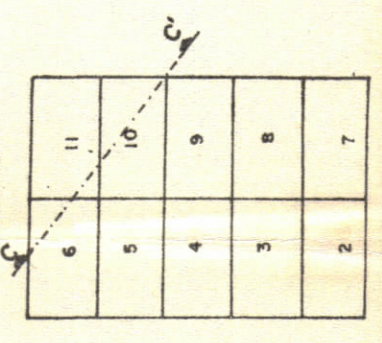


6° LECTURA (MAYO - 1967)-(F)  
7° LECTURA (JULIO - 1967)-(G)  
8° LECTURA (AGOSTO-1967)-(H)

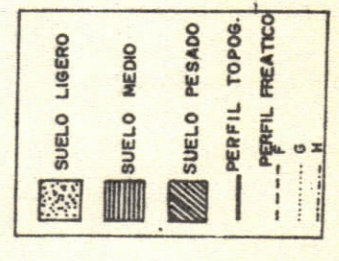
ESCALA GRAFICA



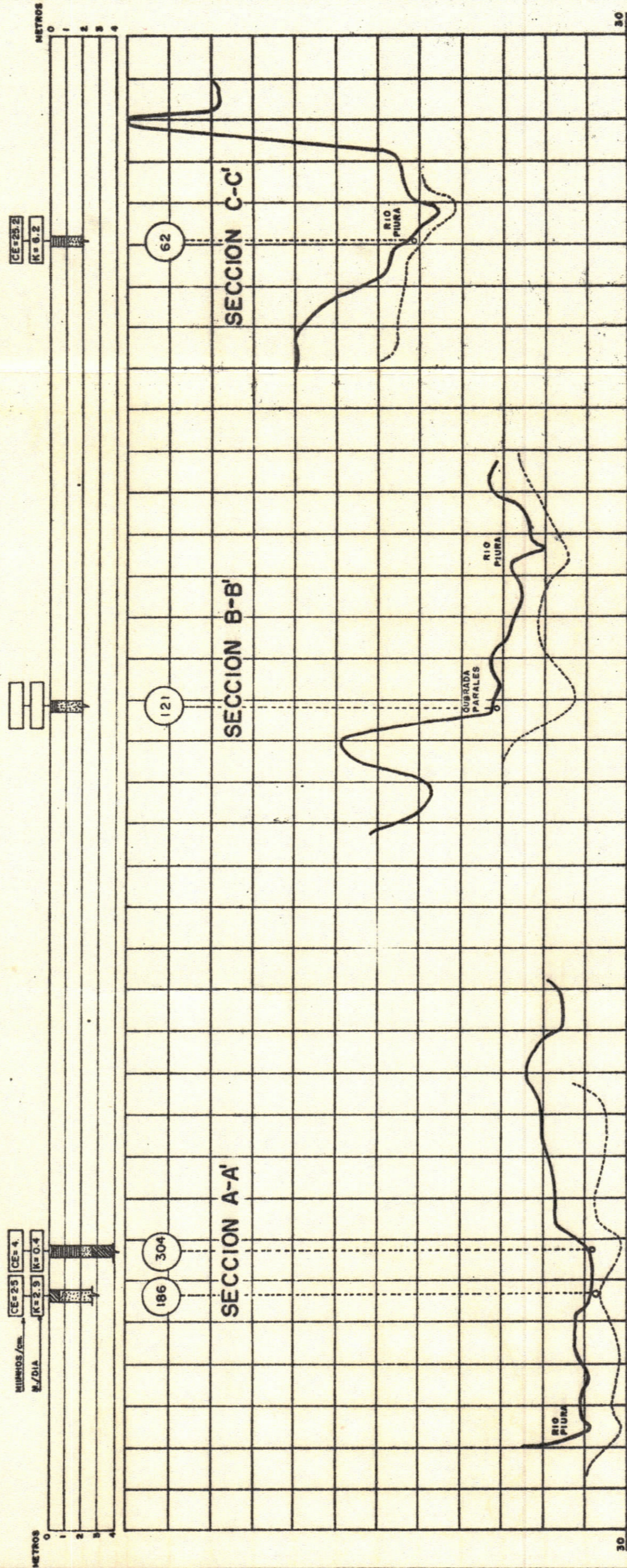
INDICE



LEYENDA

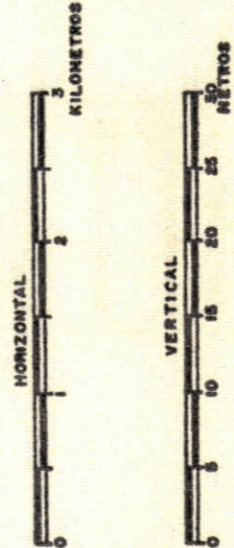


# PERFIL TRANSVERSAL

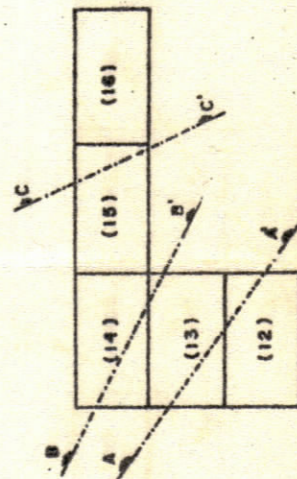


(ABRIL - 1967) - (2)

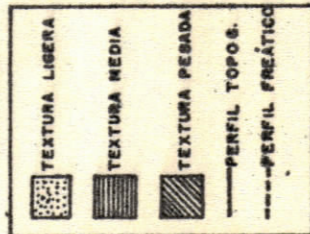
## ESCALA GRAFICA



## INDICE



## LEYENDA



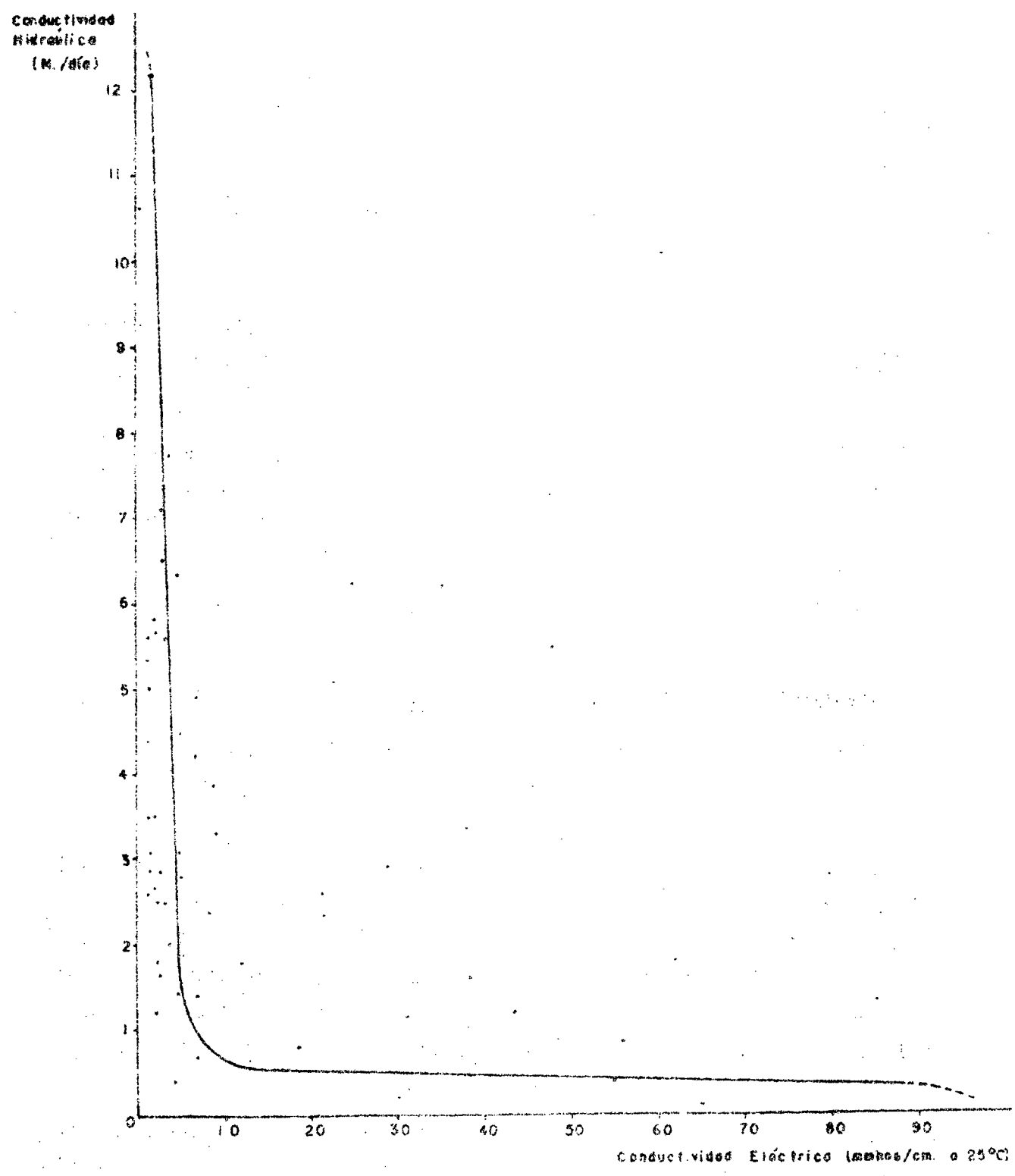


Fig. 6 Relación entre los valores de Conductividad hidráulica de los suelos y Conductividad eléctrica de la napa freática del Valle de Piura.

- c) Entre los 20 y 30 m se puede encontrar un suelo arenoso o estratificaciones de arena, grava y limo que en algunos casos se prolonga hasta la superficie, reemplazando a las anteriormente mencionadas.
- d) A más de 30 m de profundidad es casi seguro encontrar una capa de arcilla compacta que constituiría el estrato impermeable del acuífero general del valle.

Del estudio de los perfiles de los pozos de observación, instalados a la profundidad de 4 a 8 m por CENDRET, con el fin de estudiar las fluctuaciones del nivel freático en el valle, se puede deducir lo siguiente:

La primera capa de suelo hasta los 4 m de profundidad definida en general como de textura media, en realidad está constituida por estratificaciones de diversa textura, incluso depósitos lenticulares de arcilla, formados por la sedimentación del material fino que llevan en suspensión las aguas del río.

Algunos de estos perfiles se muestran en las secciones A-A', B-B' y C-C' -en las figuras 2, 3, 4 y 5-.

### 3.2 Conductividad hidráulica de los suelos

Una de las observaciones más importantes en los estudios de drenaje, es la determinación de la conductividad hidráulica de los suelos.

La conductividad hidráulica de los suelos interviene en todas las fórmulas de drenaje y representa la capacidad de los suelos para transmitir el agua que fluye a través de ellos en condiciones de saturación. En suelos salinos la conductividad hidráulica está relacionada con la salinidad de los suelos como lo asegura Talsma (1963) y se confirma en el caso de Piura con la información representada en la Figura 6. Suelos con altos valores de C. E. están asociados con bajos valores de conductividad hidráulica, debido posiblemente a las siguientes razones:

- a) El flujo de agua restringido permite que estas disuelvan las sales presentes en el suelo y aumenten la concentración salina del agua freática, por no ser fácilmente renovadas.
- b) Si el flujo de agua es restringido, la evaporación del agua desde la

superficie del suelo va a aumentar la salinidad del perfil, ya que la posibilidad de lavado es menor.

La conductividad hidráulica de los suelos del valle de Piura ha sido determinado por CENDRET, utilizando el método del agujero de barrena, obteniéndose en cada punto (pozo) un solo valor de conductividad hidráulica (K) válido para todo el perfil donde se hizo la prueba.

La gran variación de los perfiles superficiales, hasta 8 m de los suelos del valle se refleja en los valores de la conductividad hidráulica obtenida. CENDRET en 545 pruebas realizadas ha obtenido valores de conductividad hidráulica que varían desde 0.025 m/día hasta 11 m/día. El gran número de valores de K hace que no sea práctico calcular los espaciamientos de drenes con cada uno de estos valores. La solución que se ha adoptado es la de dividir el área en estudio en zonas homogéneas tal como aparece en la Tabla 2. Ello significa que para cada zona homogénea tendremos dos valores extremos de espaciamiento, cuya diferencia no debe ser grande y nos permite escoger, para cada una de estas zonas homogéneas, un espaciamiento intermedio de acuerdo a las circunstancias.

Tabla 2 Áreas homogéneas en conductividad hidráulica (K).

Denominación	- L	L	M L	M	M R	R	+ R
Amplitud de K en m/día	< 0.025	0.025 a 0.150	0.150 a 0.500	0.500 a 1.500	1.500 a 3.000	3.000 a 6.000	> 6.000
% del área total	0	0.2	3.4	16.7	24.7	31.5	19.9

### 3.3 Posición del nivel freático en el valle de Piura.

La fisiografía es importante en lo que respecta a la posición de la tabla de agua. Las terrazas altas tendrán menos posibilidad de ser afectadas por el mal drenaje que las terrazas bajas.

De las mediciones periódicas del nivel freático en los pozos de observación construídos por CENDRET, se ha elaborado la Tabla 3 que nos indica los porcentajes del área total afectadas por diversos niveles de tabla de agua en 4 diferentes épocas, Figura 7.

Tabla 3 Profundidades de la tabla de agua y porcentaje de las áreas afectadas con estas profundidades en el valle de Piura, en 4 diferentes épocas.

Lectura	Fecha	Sobre la superficie	0-1 m	1-2 m	2-3 m	3-5 m	> 5 m
A <sub>a</sub>	1/65	0.03	1.6	18.3	44.6	30.5	4.97
C <sub>a</sub>	7/65	1.60	23.2	57.6	13.4	3.6	0.60
D <sub>a</sub>	1/67	0.20	3.2	26.8	45.5	21.3	3.00
F <sub>a</sub>	5/67	0.70	9.8	47.2	26.0	14.7	1.60

De los planos piezométricos elaborados por CENDRET, se han obtenido las secciones A-A', B-B' y C-C' para el valle de Piura, que nos muestra gráficamente la fluctuación del nivel freático en diversas épocas.

La Figura 7 es una forma de representar gráficamente los datos de la Tabla 3, para indicar cómo varía el área afectada con diversas amplitudes de profundidad del nivel freático. En cada una de las curvas de la Figura 7 podemos ver lo siguiente:

- a) Puntos inferiores que corresponden a las lecturas hechas antes de aplicar los riegos pesados o machacos y antes que las lluvias y avenidas del río influyan en el nivel freático del valle.
- b) Puntos superiores que corresponden a las lecturas hechas posteriormente a la aplicación de los riegos pesados y cuando la influencia de las avenidas y lluvias es máxima en lo que se refiere a la elevación del nivel freático. Entre estos puntos el que tiene una especial significación es el correspondiente al mes de Julio de 1965 ya que corresponde a una época de inundaciones.

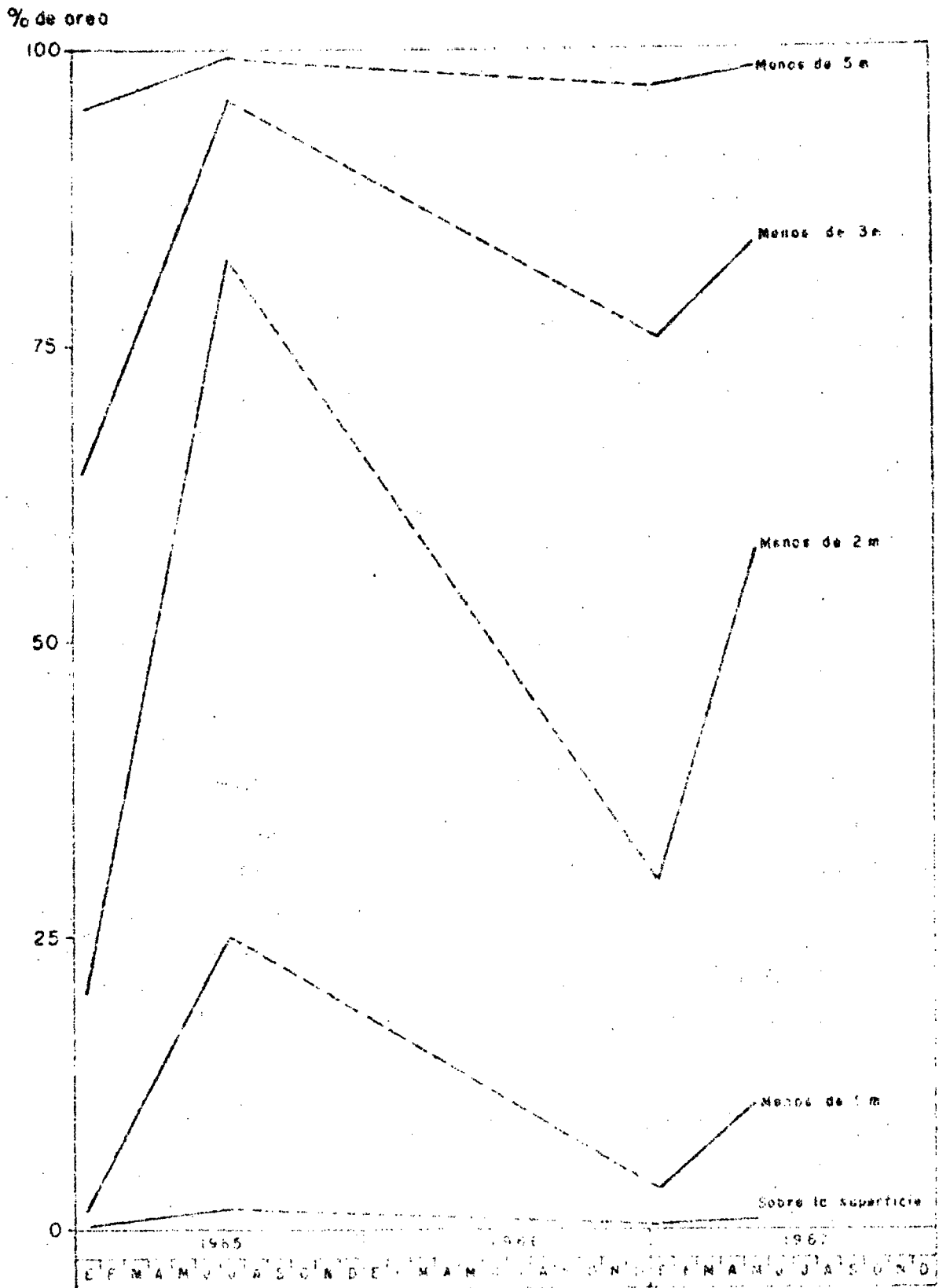


Fig 7 Variación del oro, en porcentaje acumulado, afectadas con diversas profundidades de tabla de agua, en Piura.

### 3.4 Grado de salinidad de los suelos y de la napa freática.

Los problemas de salinidad de los suelos por lo general están relacionados con la presencia de una tabla de agua alta.

Los suelos del valle de Piura, como todos los suelos costeros del Perú, tienen sales en su perfil, ya sean de origen marino o transportadas por el agua de riego. Estas sales son disueltas parcialmente por el agua de parcelación y pasan a formar parte de la tabla de agua. Cuando existe una tabla de agua cercana a la superficie, como es el caso de Piura, las sales de la napa freática ascienden favorecidos por la textura media de los suelos y la alta evaporación acumulándose en la superficie y afectando el desarrollo de los cultivos. La relación que existe entre la salinidad de la tabla de agua y la salinidad de los suelos, va a ser uno de los criterios que posteriormente se utilizará para calcular el requerimiento de lavado de los suelos.

La salinidad de los suelos también puede ser relacionada con la salinidad del agua de riego, sobre todo cuando esta tiene una excesiva cantidad de sales en solución. En el caso de Piura parece ser más importante la salinidad de la tabla de agua, cuya influencia sobre la salinidad de los suelos es particularmente notable en la época de barbecho.

El período de barbecho en el valle de Piura corresponde a los meses de Octubre a Enero, cuando existe una tabla de agua salina cercana a la superficie. Este tiempo, en la práctica se convierte en un período de resalinización de los suelos. Mediciones hechas de la salinidad de la tabla de agua en mmhos/cm a 25 °C dan los valores que se indican en la Tabla 4.

Tabla 4 Areas afectadas con diversos niveles de salinidad en el valle de Piura

Nivel de salinidad de la tabla de agua en mmhos/cm a 25 °C	Area afectada en % del total
0 - 5	48.5
5 - 10	21.5
> 10	30.0

Los valores mayores de 95 mmhos/cm a 25 °C se han registrado en la zona de Monte Viejo y los valores más bajos se registran en diversas partes del Valle en forma indiferente.

El grado de salinidad del agua de riego es de 0.25 mmhos/cm a 25 °C en la parte alta del valle y alcanza valores superiores a 1.2 mmhos/cm a 25 °C en la parte baja del valle. Este último valor de salinidad si bien es cierto representa un peligro de salinización para los suelos recuperados y suelos afectados, ello puede evitarse aplicando un exceso de agua de riego que evite la acumulación de sales en el perfil del suelo. En estas condiciones se hace indispensable un buen sistema de drenaje que lleve fuera del área agrícola el agua de percolación cargada de sales.

### 3.5 Régimen de agua para el riego y necesidades de los cultivos.

En la actualidad el valle de Piura no cuenta con aportaciones regulares de agua para la agricultura, el agua de riego sólo es disponible en épocas de avenida del río Piura que no tiene un ciclo regular.

En el valle de Piura, en los últimos años se ha vivido una experiencia muy valiosa para el futuro de las irrigaciones en el Perú.

La derivación del río Quiroz al río Chipillico y la construcción del reservorio de San Lorenzo, en cuanto a los recursos de agua, significan una ampliación y una regularización de ellos, respectivamente. Los nuevos recursos de agua regularizados servirán para irrigar nuevas tierras y complementar el riego de los valles Bajo Piura y el de Chipillico.

Se formó así un sistema de distribución formado por: 1) Los de la Colonización San Lorenzo; 2) Los agricultores del valle Bajo Piura y 3) Los agricultores del Chipillico. Sin embargo, en este sistema, no se consideran las aguas del río Piura, por ser de naturaleza eventual y los agricultores de la parte alta del valle, sobre el área que dominan la quebrada de San Francisco donde descargan las aguas del reservorio, han ido incrementando sus áreas de cultivo utilizando para ello, especialmente en los años secos, la casi totalidad de las aguas del río Piura.

En estas condiciones los agricultores del valle Bajo dependen casi exclusivamente de las aguas del reservorio y de pozos profundos. Esta si-

tuación ha originado una gran presión por parte de los agricultores del valle Bajo de Piura para incrementar sus derechos sobre las aguas del reservorio. En la mayoría de los casos han logrado este propósito y la Colonización de San Lorenzo se ha ido reduciendo de 45,000 Has. dominadas por canales, a 25,000 Has. que se reconocen oficialmente.

La distribución de las aguas de los tres miembros del sistema han ido variando con el tiempo y en la actualidad se rige por el D.S. N° 37; el D.S. 10-F y la R.S. N° 04-DAR. El más importante de estos dispositivos es el D.S. 10-F que fija las áreas oficiales de los tres miembros del sistema como sigue:

San Lorenzo	25,000 Ha
Bajo Piura y Comunidades	38,000 Ha
Chipillico	2,148 Ha
	<hr/>
Total:	65,148 Ha

Conforme al D.S. 10-F, la distribución de la masa total de agua entre los miembros del sistema, se efectúa de acuerdo al pronóstico elaborado en el mes de Diciembre por la Comisión distribuidora de las aguas del sistema.

Si el abastecimiento se considera normal (834'500,000 m<sup>3</sup>) se siembra el total del área; si el año se considera deficitario se fijará masas por hectáreas distintas para San Lorenzo, Bajo Piura y valle del Chipillico, dándose preferencia a las 10 primeras Ha para todos los miembros del sistema con dotaciones completas, repartiéndose el saldo disponible de acuerdo a los siguientes porcentajes:

Colonización San Lorenzo	41.3 %
Valle Bajo Piura	52.5 %
Chipillico	6.2 %

Para el valle Bajo de Piura el D.S. 10-F indica lo siguiente:

- a) En primer lugar tienen derecho los pequeños agricultores con menos de 10 Ha al 100 % de la dotación que les corresponde o sea 10,500 m<sup>3</sup>/Ha campaña, distribuidos de la siguiente manera:

1 Machaco 3,000 m<sup>3</sup>/cuadra (4,200 m<sup>3</sup>/Ha)

3 riegos de 1,500 m<sup>3</sup>/cda. (2,100 m<sup>3</sup>/Ha riego)

Estos tres riegos llamados de repaso son entregados cada 45 días.

- b) Luego de repartida el agua a los pequeños agricultores, el resto recibe una dotación de agua suficiente para regar 10 Ha.
- c) El excedente de agua que hubiese es distribuída proporcionalmente al área de cada agricultor.

Esta distribución de agua generalmente no se cumple en cuanto a la dotación y en cuanto al período de entrega, lo que hace que tenga que reducirse el área de cultivo y la frecuencia de riego sea más distanciada.

3.5.1 Determinación del uso consuntivo en el valle de Piura. En la actualidad no se dispone de valores experimentales de uso consuntivo para el algodón, el principal cultivo del valle de Piura. Sin embargo se tiene información de algunos agricultores progresistas que han llevado registros de la cantidad de agua aplicados en diferentes años para obtener una cosecha de algodón. En la Tabla 5 se presenta la información proporcionada por el Fundo arihuala, ubicado en la parte media del valle Bajo. Esta información se puede comparar con el uso consuntivo estimado mediante la fórmula de Blanney y Criddle<sup>4</sup>, para el cultivo de algodón y condiciones del valle Bajo de Piura, que se muestra en la Tabla 6.

En la Tabla 6 se ha utilizado como temperatura media mensual los promedios de temperatura media mensual de 32 años (período de 1932-1964) obtenidos del Boletín de Estadística, Meteorología e Hidrología del Ministerio de Agricultura y el dato correspondiente a porcentajes de horas de luz se ha obtenido de una tabla construida para diferentes posiciones de la tierra con respecto al sol durante el año astronómico para diferentes latitudes. Israelsen y Hansen (1965).

---

<sup>4</sup> Israelsen, O.W. and Hansen (1965) "Principios y Prácticas del riego" Editorial Reverté, Barcelona, Págs. 225-255.

Tabla 5 Fundo Marihuala -Catacaos- Cantidad de agua de riego por Ha durante los años 1940-1967 y cosecha obtenida en el algodónero.

Año	Riegos en m <sup>3</sup> /Ha.		Total del agua aplicada en la Campaña m <sup>3</sup> /Ha.	Cosecha en cargas/Ha.	Caudal del año
	Machaco	1°, 2° y 3°			
1940	4750	5190	9,940	17.00	normal
1941	4820	5120	9,940	19.88	de inundación
1942	4980	1420	6,400	14.20	escaso en aguas
1943	Estimado		9,940	15.60	de inundaciones
1944	3800	4600	8,400	17.00	normal
1945	3380	3870	7,250	9.94	normal
1946	3400	4000	7,400	9.94	normal
1947	Sembrado	1/10	5,630	9.94	extremadamente seco
1948	Sembrado	1/20	4,260	- - -	extremadamente seco
1949	4250	3750	8,000	22.72	muy irregular
1950	No discurrió el río		-----	-----	sin agua
1951	No discurrió el río		-----	-----	sin agua
1952	3340	2260	5,600	9.94	escaso en aguas
1953	Estimado		9,940	9.94	mucha agua y plagas
1954	4250	5150	9,400	19.98	entró en vigencia el Quiroz
1955	3550	6890	10,440	15.60	normal
1956	3400	6050	9,450	19.98	normal
1957	2700	5840	8,540	15.60	normal
1958	3450	5250	8,700	19.98	de precipitaciones
1959	3500	5660	9,160	19.98	abundante
1960	3050	6330	9,380	19.98	normal
1961	3350	4350	7,700	19.98	normal
1962	3300	6900	10,200	19.98	normal
1963	Ayudado con pozos		10,170	19.98	escaso en aguas
1964	Ayudado con pozos		8,900	22.72	escaso en aguas
1965	Estimado		8,750	19.98	de inundaciones
1966	3400	4780	8,180	22.72	seco
1967	3725	3415	7,140	9.94	extremadamente seco

Una carga es igual a 364 libras, o 168 kilogramos.

Marinualá es uno de los fundos sin problemas de drenaje y salinidad

Tabla 6 Consumo mensual de agua por el cultivo del Algodón en el valle de Piura, de acuerdo a la fórmula de Blanney y Criddle.

Mes	°C	°F (T)	% horas de Luz (P)	Coefficiente (K)	Lámina (U) cm.	Lámina acumulada utilizada cm.
Enero	27.3	81.1	8.5	1.65	11.4	11.6
Febrero	28.4	83.0	8.4	1.65	11.4	23.0
Marzo	28.5	83.2	8.3	1.65	11.4	33.9
Abril	27.1	80.8	8.2	1.65	10.9	44.1
Mayo	24.9	76.8	8.1	1.65	10.2	54.0
Junio	23.1	73.6	8.1	1.65	9.9	63.6
Julio	22.2	72.0	8.1	1.65	9.6	

De la Tabla 6 podemos estimar que el cultivo de algodón requiere de 6,360 m<sup>3</sup>/ha de agua, para obtener una cosecha.

Si se considera un volumen adicional de agua, para mantener el balance de sales en el suelo, podemos hacer el siguiente cálculo:

Aplicando la fórmula 1, y para los valores o sea:  $D_{cw} = 63.6$  cm,  $C_{dw} = 4$  mmhos/cm y  $C_{iw} = 1.2$  mmhos/cm, tenemos:

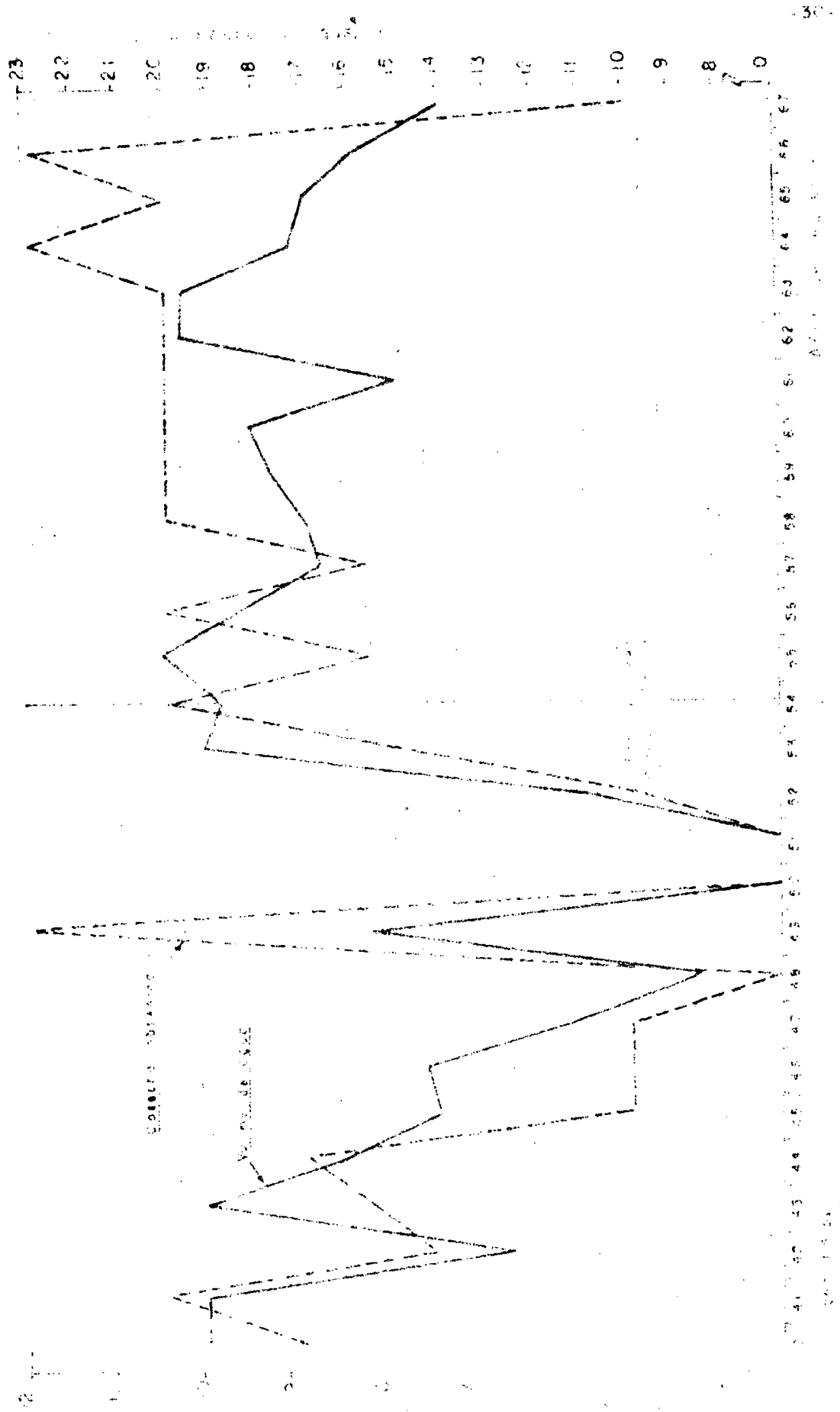
$$D_{dw} = (63.6 \times 1.2) / (4.0 - 1.2) = 27.3 \text{ cm de agua}$$

Luego la lámina total de riego necesaria será:

$$D_{iw} = 63.6 + 27.3 = 90.9 \text{ cm}$$

O sea podemos estimar que en caso de que se disponga de agua con 1.2 mmhos/cm a 25 °C, son necesarios 9090 m<sup>3</sup>/Ha de agua para obtener una cosecha de algodón en el valle de Piura, sin salinizar el perfil.

Si comparamos estos resultados con los que figuran en el registro del Fundo Marínuala (Tabla 5) vemos que con aplicaciones totales de 8,500 m<sup>3</sup>/Ha de agua se obtienen cosechas iguales o mayores a 19 cargas/ha consideradas buenas o muy buenas. La Figura 8 muestra claramente la influencia que ha tenido la regulación del riego con la construcción del reservorio San Lorenzo, sobre todo en los primeros años cuando satisfacía



2 yr

1 yr

6 mo

3 mo

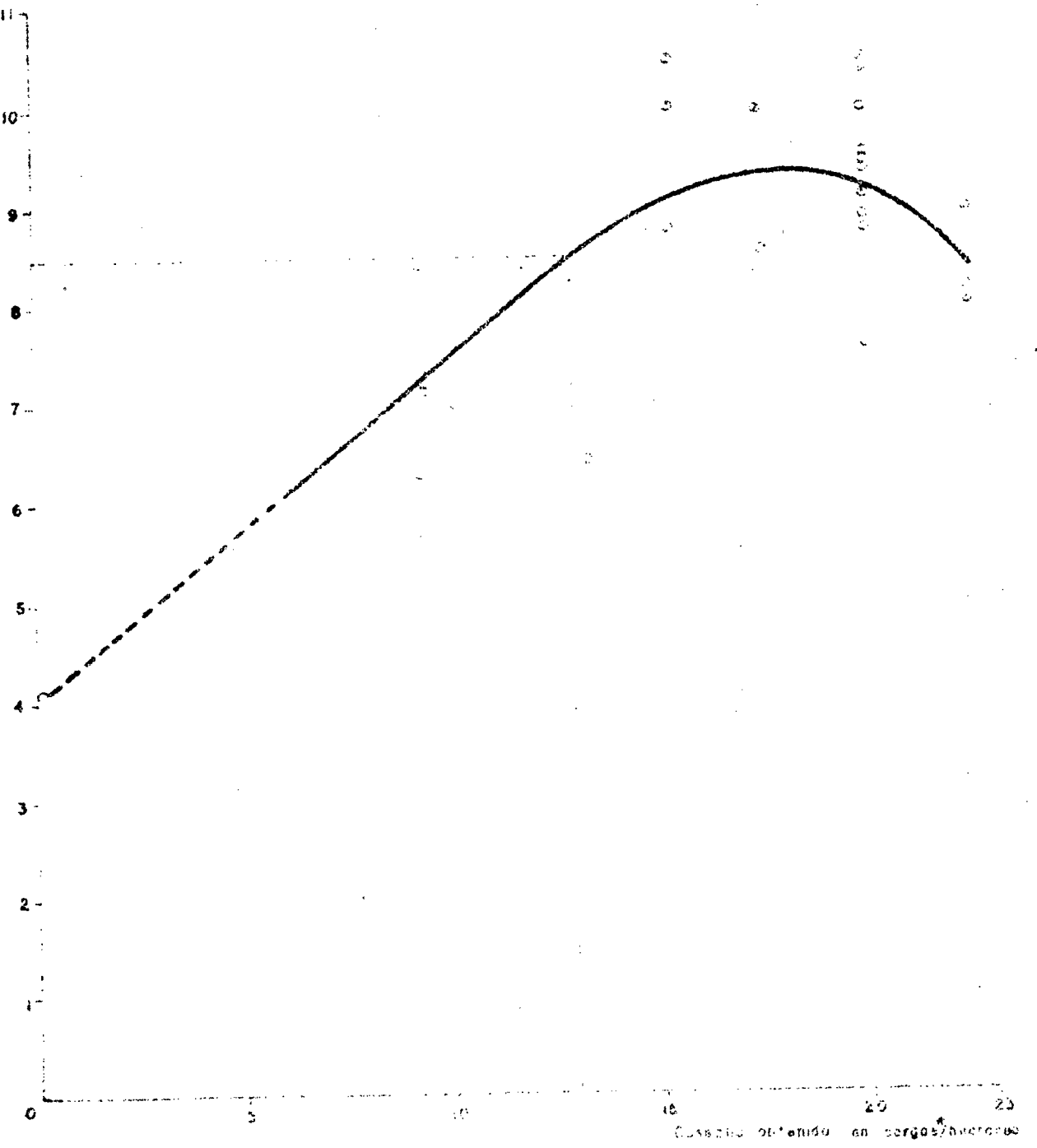
1 mo

1 day

1941 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67

1941 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67

Volumen total por parcela (m<sup>3</sup>)



(Carga = 304 lbs)

Fig. 9 Relación entre el volumen de agua aplicado y cosecha obtenida en la hacienda Narihuatá, F. Uru durante el período 1940-1967.

ampliamente las necesidades de agua.

En la Figura 9 se observa claramente lo siguiente:

- a) El algodón en Piura requiere un mínimo de 4,000 m<sup>3</sup>/Ha para llegar a la madurez.
- b) El incremento de la cosecha de algodón está relacionada directamente a los volúmenes de agua aplicados entre los 4,000 y 8,500 m<sup>3</sup>/Ha campaña.
- c) Sobre los 8,500 m<sup>3</sup>/Ha el volumen de agua deja de ser un factor limitante y la cosecha depende de otros factores que inciden en la producción como son oportunidad de los riegos, presencia de plagas y enfermedades, dosis de fertilizantes, etc.

#### 4. EVALUACION Y CRITERIOS DE DRENAJE PARA LAS CONDICIONES DE PIURA

Para diseñar un sistema de drenaje es necesario conocer:

- a) La profundidad de drenes, y
- b) El distanciamiento de los drenes

Estos dos elementos del sistema están relacionados y pueden ser determinados experimentalmente, haciendo pruebas de campo durante un tiempo prolongado, de por lo menos un año. Sin embargo conociendo las condiciones de la zona pueden ser estimados mediante la aplicación de fórmulas.

Lo más recomendable, debido al alto costo de los drenes es estimar primero la profundidad y el espaciamiento de ellos, para diferentes condiciones típicas que se presentan en el valle y después comprobar experimentalmente los valores obtenidos.

El empleo de las fórmulas de drenaje requiere del conocimiento de ciertos elementos de diseño, tales como la conductividad hidráulica de los suelos, la profundidad de los drenes, el coeficiente de drenaje, la profundidad del estrato impermeable y el perímetro mojado de los drenes. A continuación se presenta las razones que han influido en seleccionar determinados valores para los elementos de diseño arriba mencionados.

##### 4.1 Elementos de diseño

4.1.1 Profundidad de los drenes:(b). Basándose en las experiencias obtenidas en la Hacienda Cumbibira, Arribas (1961) recomienda instalar drenes a profundidades mayores de 2.5 m para mantener la tabla de agua debajo de los 2.0 m de la superficie del suelo. En los sistemas de drenaje instalados en el valle de Piura que en su mayoría no realizan en trabajo esperado, posiblemente debido a que han sido excavados sólo hasta 2 m y se encuentran muy distanciados, se estima conveniente instalar los drenes a una profundidad de 2.8 m a fin de mantener la napa freática a 2 m de

profundidad.

4.1.2 Coefficiente de drenaje: (q). Como se mencionó anteriormente, en la recuperación de los suelos salinizados existen 2 etapas diferentes, la recuperación y la explotación.

En la primera etapa se aplican riegos frecuentes con la finalidad de bajar el contenido de sal del suelo hasta un nivel conveniente para el desarrollo de los cultivos, lo cual hace que el coeficiente de drenaje (q) sea mayor.

En la segunda etapa o sea de explotación, que se inicia después de haber terminado la recuperación, el agua de riego incluye una lámina adicional para eliminar el exceso de sal que el agua de riego trae en solución y para mantener un balance de sales favorable en el perfil del suelo. En esta segunda etapa, el coeficiente de drenaje es menor y permanente.

El coeficiente de drenaje en cada una de estas etapas puede estimarse en tres formas diferentes:

A) Estimando el coeficiente de drenaje (q) para la etapa de recuperación.

Puede utilizarse dos criterios, a saber:

a) Estimando la lámina de agua necesaria para bajar la salinidad del suelo hasta el nivel deseado.

Un ejemplo de este criterio es la fórmula de Coachella, California, desarrollada para suelos de textura franco arcillosa y estratificados. Esta fórmula ha dado buenos resultados cuando la concentración salina se trata de reducir del 80 al 20 %. Para los efectos estimativos que deseamos puede considerarse correcta su utilización.

Fórmula de Coachella:

$$\frac{D_L}{D_S} = \frac{1}{5 \left\{ \begin{array}{l} C_{dw_1} \\ C_{dw_0} \end{array} \right\}} + 0.15 \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

- $D_s$  = Espesor de suelo lavado (m)  
 $D_L$  = Lámina de agua aplicada (m)  
 $D_{dw_1}$  = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo final, aproximadamente la del agua de drenaje final.  
 $C_{dw_0}$  = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo inicial, aproximadamente la del agua de drenaje inicial.

b) Estimando la lámina de agua necesaria para bajar la concentración salina de la napa freática.

Este criterio se puede desarrollar utilizando una ecuación de balance de sales, basada en el principio de conservación de masa.

Ecuación de balance de sales:

$$C_{iw} D_L + C_{dw_0} D_s p = C_{dw_1} (D_L + D_s p) \quad (3)$$

Donde:

- $C_{iw}$  = Conductividad eléctrica del agua de riego.  
 $p$  = Porosidad efectiva de drenaje  
 $D_s$  = Espesor de suelo lavado (m)  
 $D_L$  = Lámina de agua aplicada (m)  
 $C_{dw_1}$  = Conductividad eléctrica final de la napa freática.  
 $C_{dw_0}$  = Conductividad eléctrica inicial de la napa freática.

El espesor de suelo ( $D_s$ ) en el caso de la ecuación (3) se refiere al espesor del acuífero cuya agua va a ser diluída de una concentración inicial ( $C_{dw_0}$ ) a una concentración final ( $C_{dw_1}$ ) y este espesor puede ser estimado como 1/6 del espaciamiento entre drenes. (Van Deemter, 1950).

En el caso de Piura, teniendo una napa freática muy superficial y en el 50 % de los casos un estrato de suelo impermeable a profundidades variables, se estima un valor promedio de  $D_s$  igual a 5 m.

B) Estimando el coeficiente de drenaje ( $q$ ) en el segundo período de mantenimiento:

Este valor se puede estimar por medio de la ecuación (1). Los cálculos de estos coeficientes de drenaje se encuentran tabulados en la Tabla 7.

El coeficiente de drenaje ( $q$ ) promedio que se podría utilizar en el cálculo de los espaciamientos es 0.005 m/día, que corresponde al promedio de lo requerido en la etapa de recuperación y casi el doble de lo requerido en la segunda etapa, en que el drenaje es menos exigente.

Tabla 7 Cálculo del coeficiente de drenaje para las etapas de recuperación y mantenimiento.

		mmhos/cm a 25°			Lámina (m)			Años t	m/día q
		C <sub>dw<sub>o</sub></sub>	C <sub>dw<sub>1</sub></sub>	C <sub>iw</sub>	D <sub>s</sub>	D <sub>L</sub>	D <sub>cw</sub>		
Primera	Fórmula de	90	4	--	2	9.3	--	5	0.0051
	Coachella	12	4	--	2	1.5	--	1	0.0041
Etapa I	Ecuación 3	90	3	1.2	5	12.0	--	5	0.0066
	Caso 1.b	12	3	1.2	5	1.3	--	1	0.0034
Segunda									
Etapa II	Ecuación 1	--	3	1.2	-	---	0.004		0.0027

4.1.3 Profundidad del estrato impermeable (Y). Del análisis de los perfiles de suelo del valle de Piura se deduce que en más del 50 % de las observaciones el estrato impermeable está a 5 m de profundidad, lo cual coincide en cierta forma con el criterio de que cuando no se encuentre este estrato impermeable en un suelo estratificado se use una profundidad (Y) igual al doble de la profundidad de los drenes.

Para aquellos en que se compruebe que el estrato impermeable se encuentra a más de 1/4 del espaciamiento entre drenes, en el presente trabajo se ha considerado que esta profundidad puede ser reducida a 30 m para los efectos de cálculo.

4.1.4 Perímetro mojado de los drenes (U). Este valor, si bien es cierto no tiene mucha influencia en el cálculo de los espaciamientos, es necesario suponerlo para iniciar el cálculo. Para el caso de Piura se ha consi-

derado que 0.8 m es un valor promedio adecuado. Arribas (1961).

Este valor puede ser ajustado posteriormente cuando se hayan estimado los espaciamientos entre drenes.

Para el caso de drenes entubados, el valor del perímetro mojado se estimará considerando tubos de 20 cm de diámetro.

#### 4.1.5 Fórmulas para el cálculo de los espaciamientos:

Las fórmulas que pueden ser utilizadas para estimar el espaciamiento entre drenes son principalmente 5:

La de Donnan;

La de Hooghoudt;

La de Ernest;

La de Kirkham; y

La de Clover

Cada una de estas fórmulas suponen ciertas condiciones de diseño:

En la Tabla 8 aparecen las condiciones supuestas y condiciones determinadas en el valle de Piura e indicadas con una aspa las fórmulas que contemplan una situación similar.

Tabla 8 Condiciones estimadas en el valle de Piura y fórmulas para el cálculo de los espaciamientos de drenes que contemplan una situación semejante.

Condiciones de diseño supuestas en Piura	Fórmulas de drenaje				
	Donnan	Hooghoudt	Ernst	Kirkham	Glover
Aplicación uniforme del agua	x	x	x	x	x
Suelo homogéneo	x	x	x	x	x
Un solo valor de porosidad	x	x	x	x	x
$Y < 1/4 L$	x	x	x	x	x
$Y > 1/4 L$	-	x	x	x	-
Flujo permanente	x	x	x	x	-
Flujo radial	-	x	x	x	-
Drenes enterrados a Prof. Int.	-	x	x	x	x

De la Tabla 8 se deduce que la fórmula de Hooghoudt, Ernst y Kirkham son igualmente válidas para estimar los espaciamientos de drenes en el valle de Piura, pero teniendo en cuenta que la fórmula de Kirkham da resultados muy similares a los de Hooghoudt, en los casos de suelos homogéneos por estar basados en los mismos principios y debido a la difícil solución de la fórmula de Kirkham ella no se considera en el presente estudio.

La fórmula de Donnan será utilizada en la comparación de resultados, por ser de fácil solución y ser aproximadamente válida para el caso en que la profundidad del estrato impermeable es de 5 m. Mayores detalles de estas fórmulas y solución de las tres fórmulas cuyos resultados van a ser comparados se presentan en los apéndices A y B.

#### 4.2 Cálculo de costos para la construcción de drenes en el valle de Piura.

4.2.1 Características de los drenes: En Piura usualmente se construyen drenes abiertos con un talud 1. 1 y una plantilla de 50 cm

4.2.2 Costo de los tubos: En la fábrica los tubos de arcilla de 20 cm de diámetro y 35 cm de largo cuestan 1.40 soles la unidad. Llevados hasta Piura cuestan 2.00 soles la unidad.

#### 4.2.3 Costos de excavación:

A máquina : 12.00 soles el  $m^3$

A mano : 10.00 soles el  $m^3$  hasta una profundidad de 2 m y debajo de esta profundidad cuesta 20.00 el  $m^3$ .

4.2.4 Distribución de la tierra sobrante por el campo: Este trabajo se realiza en el campo a máquina y su costo es de 0.20 soles por  $m^3$ . Igual para el tapado de los tubos.

#### 4.2.5 Costo de construcción de 100 m de dren a 2.8 m de profundidad:

Dren abierto, a mano	10,465	soles
Dren abierto, a máquina	11,273	"
Dren entubado, a mano	11,065	"
Dren entubado, a máquina	11,865	"

Detalles de cálculo se encuentran en el Apéndice C

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

A. Los cálculos de espaciamento de drenes utilizando la Fórmula de Donnan, Hooghoudt y Ernst, para drenes entubados y drenes abiertos, son hechos para dos condiciones de profundidad de estrato impermeable, 5 m y 30 m, situaciones que generalmente se presentan en los suelos de Piura según el análisis de los perfiles. Los resultados obtenidos para valores extremos de cada rango de conductividad eléctrica de áreas homogéneas consideradas para el valle de Piura así como los costos de construcción por hectárea se encuentran en las Tablas 9, 10 y 11

B. Para formarnos una idea rápida de la proporción de área homogénea en conductividad hidráulica, con determinados espaciamentos, se han construido las Figuras 10, 11 y 12

C. Para las condiciones particulares establecidas en Piura, se han construido las Figuras 13 y 14 que sirven para estimar en forma gráfica y sencilla el espaciamento entre drenes abiertos y entubados. En el caso de la Figura 13, es una particularización del nomograma de la fórmula de Hooghoudt construido por Boumans (CENDRET, 1965) y nos permite calcular los espaciamentos para diferentes profundidades de estrato impermeable y conductividad hidráulica. La Figura 14 es igualmente una particularización del Nomograma presentado por Van Beers, (1965) y nos permite calcular los espaciamentos según la fórmula de Ernst, para la condición de estrato impermeable a 5 m y para varios valores del coeficiente de drenaje y conductividad hidráulica

Tabla 9 Espaciamiento de drenes y costos de construcción por hectárea en el valle de Piura, calculados con la Fórmula de Donnan

K	Espaciamiento para drenes entubados				Espaciamiento para drenes abiertos			
	Y= 5 m	Costo	Y= 30 m	Costo	Y= 5 m	Costo	Y= 30 m	Costo
0.025	8.6	129,000	28.0	39,500	8.1	129,000	26.0	40,200
0.150	21.1	52,500	68.0	15,300	19.7	53,000	63.0	16,600
0.500	38.5	28,750	124.0	8,900	36.0	29,000	115.0	9,100
1.500	66.7	15,600	215.4	5,140	62.0	16,900	199.0	5,250
3.000	94.4	11,700	304.5	3,640	88.0	11,900	282.0	3,720
6.000	133.0	8,300	431.0	2,560	125.0	8,350	398.0	2,640
10.000	172.0	6,420	557.0	2,000	161.0	6,500	514.0	2,040

Tabla 10 Espaciamiento de drenes y costos de construcción por hectárea en el valle de Piura, calculados con la Fórmula de Hooghoudt

K	Espaciamiento para drenes entubados				Espaciamiento para drenes abiertos			
	Y= 5 m	Costo	Y= 30 m	Costo	Y= 5 m	Costo	Y=30 m	Costo
0.025	6.31	175,000	5.83	189,000	6.71	156,000	5.91	176,000
0.150	17.17	64,500	17.73	62,400	17.63	59,300	18.67	56,000
0.500	34.15	32,400	47.71	23,200	33.80	31,000	50.61	20,700
1.500	62.11	17,800	114.69	9,650	60.12	17,400	118.42	8,800
3.000	89.62	12,300	191.39	5,800	85.90	12,200	192.81	5,400
6.000	128.64	8,600	307.52	3,600	122.42	8,550	303.61	3,450
10.000	167.44	6,600	427.22	2,600	158.70	6,600	419.36	2,500

Area  
 $\Delta h$

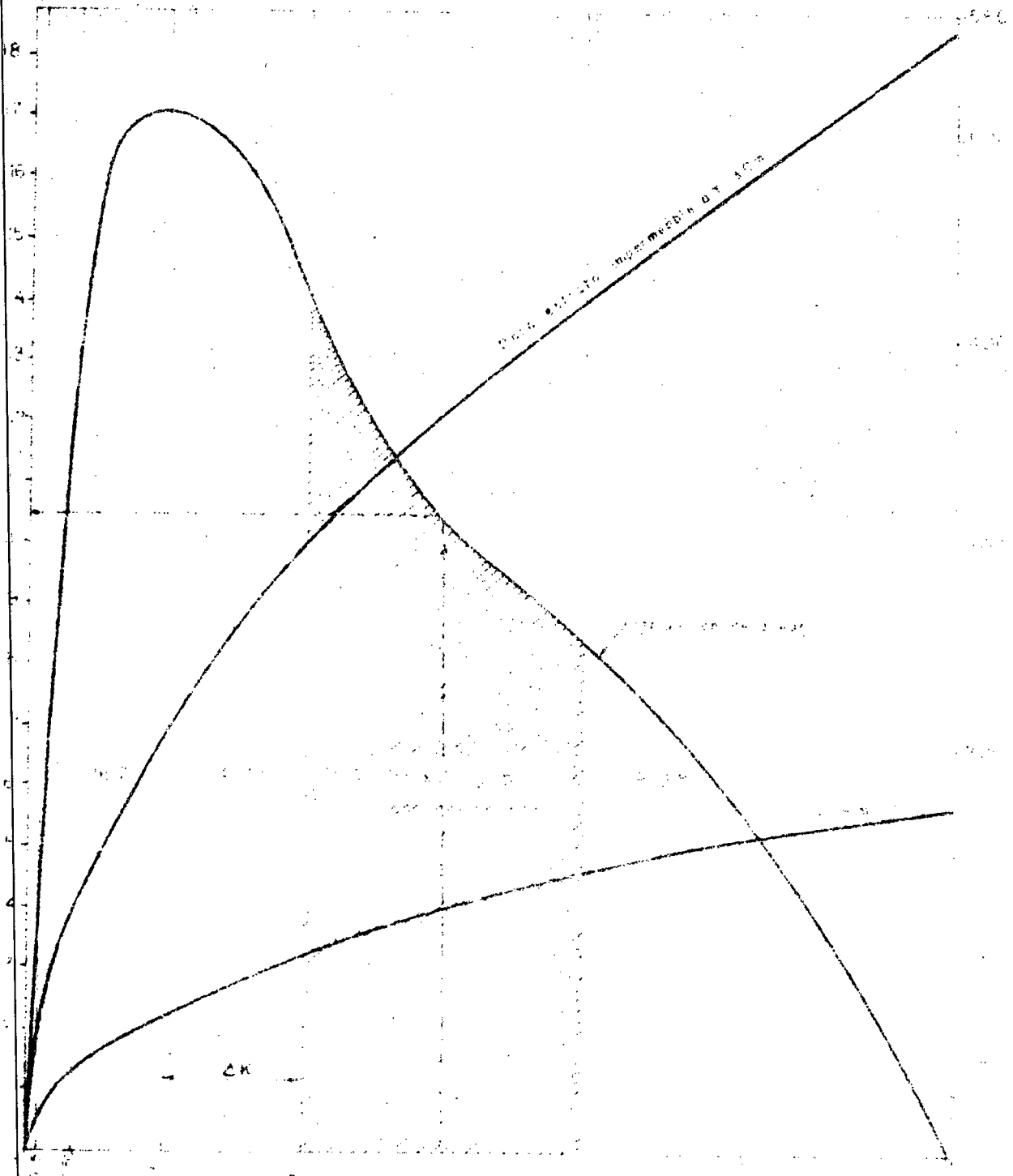


Fig.10 Espaciamentos de drenes calculados con la fórmula de Drenon y porcentaje de area con diferentes amplitudes de conductividad hidráulica del suelo de F. ura.

Tabla 11 Espaciamiento de drenes y costos de construcción por hectárea en el valle de Piura, calculados con la Fórmula de Ernst

K	Espaciamiento para drenes entubados				Espaciamiento para drenes abiertos			
	Y= 5 m	Costo	Y= 30 m	Costo	Y= 5 m	Costo	Y= 30 m	Costo
0.025	4.79	235,000	17.81	62,000	4.08	261,000	15.57	67,300
0.150	17.43	63,600	59.44	18,600	15.86	66,000	54.36	19,200
0.500	34.90	31,700	116.11	9,500	32.18	32,500	106.93	9,800
1.500	63.12	17,500	207.40	5,350	58.55	17,800	191.56	5,450
3.000	90.77	12,200	296.75	3,730	84.38	12,400	274.37	3,830
6.000	129.86	8,500	423.06	2,600	120.91	8,650	391.42	2,670
10.000	168.70	6,550	548.52	2,020	157.21	6,650	507.69	2,060

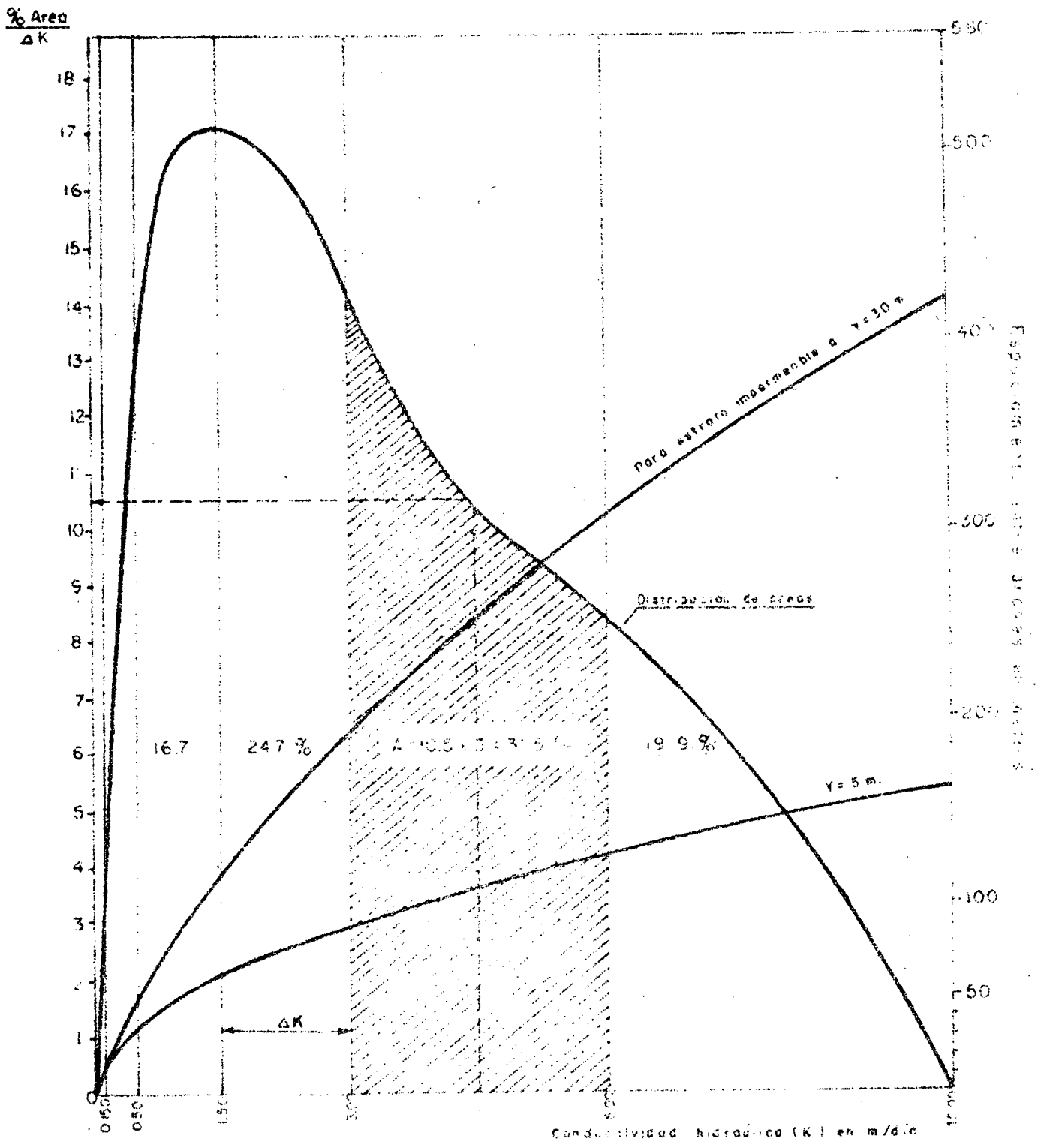


Fig. II Espociamiento de drenes calculados con la fórmula de Hooghoudt y porcentaje de área con diferentes amplitudes de Conductividad hidraulica del valle de Piura.

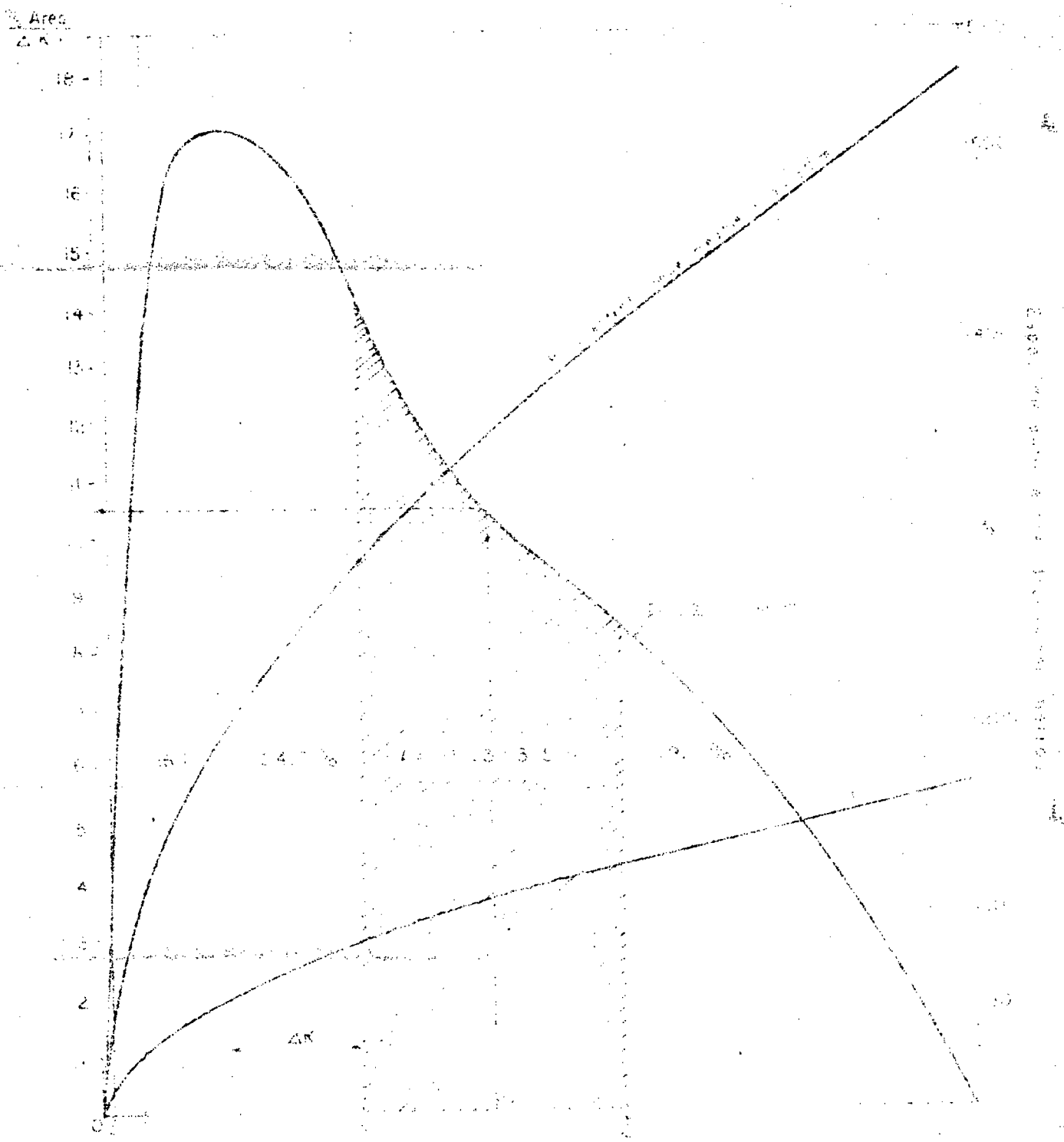
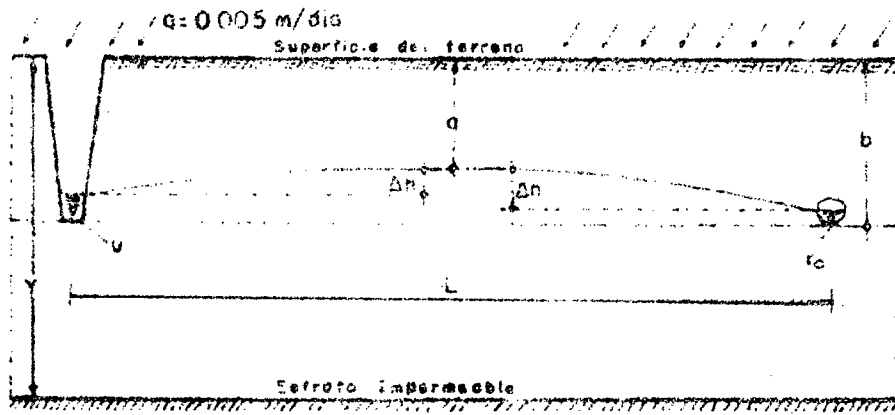


Fig. 12. Espectrograma de arenas seleccionadas con el método de Ernst y porcentaje de áreas en diferentes empujes de Conductores hidráulica del tipo de Puro



Datos para los que se ha calculado este Nomograma: Piura

- $a = 2.00 \text{ m}$
- $b = 2.80 \text{ m}$
- $U = 0.90 \text{ m}$
- $r_0 = 0.10 \text{ m}$
- $\Delta h = 0.70 \text{ m}$  (tubo)
- $\Delta h = 0.60 \text{ m}$  (zanja)

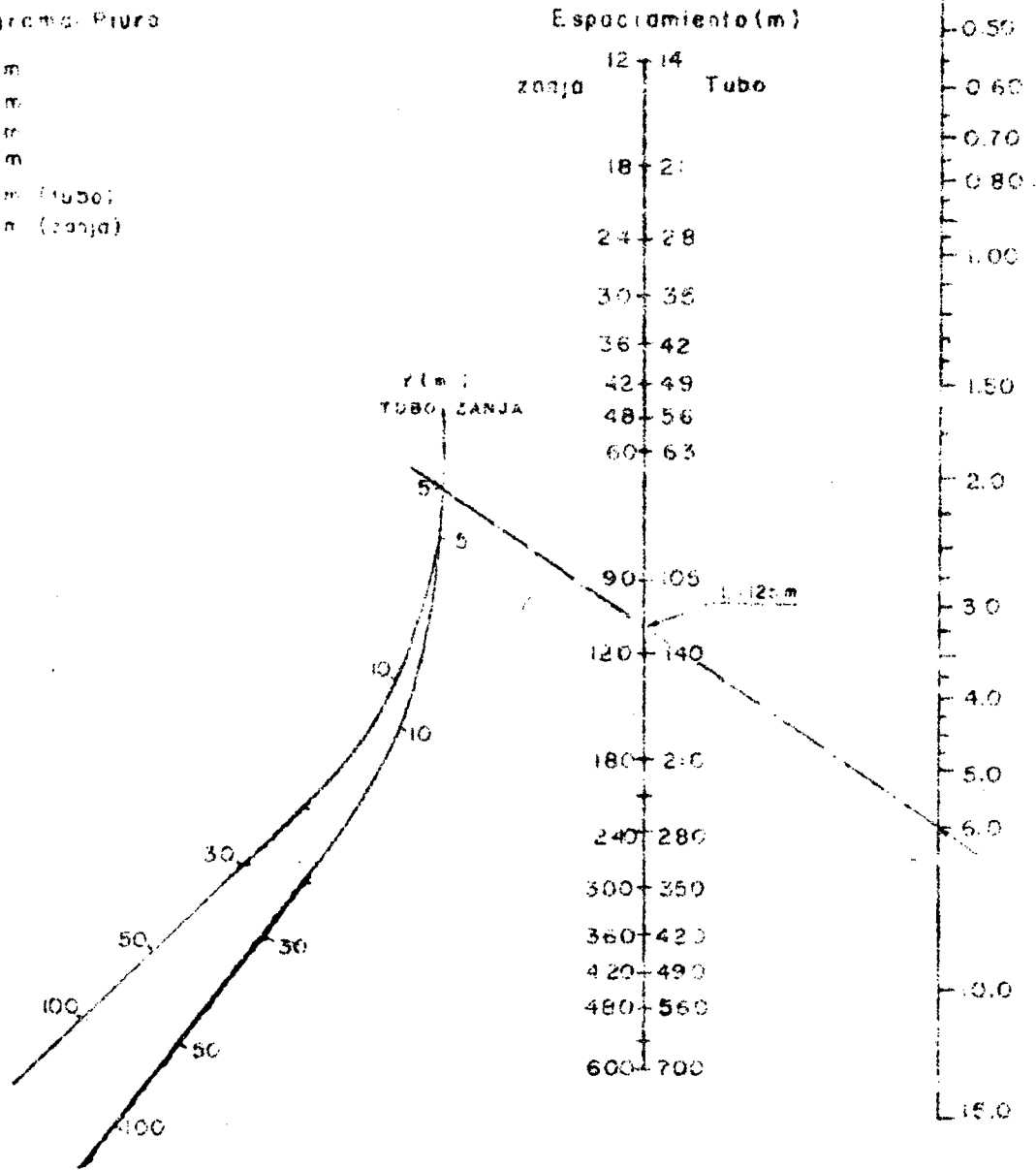
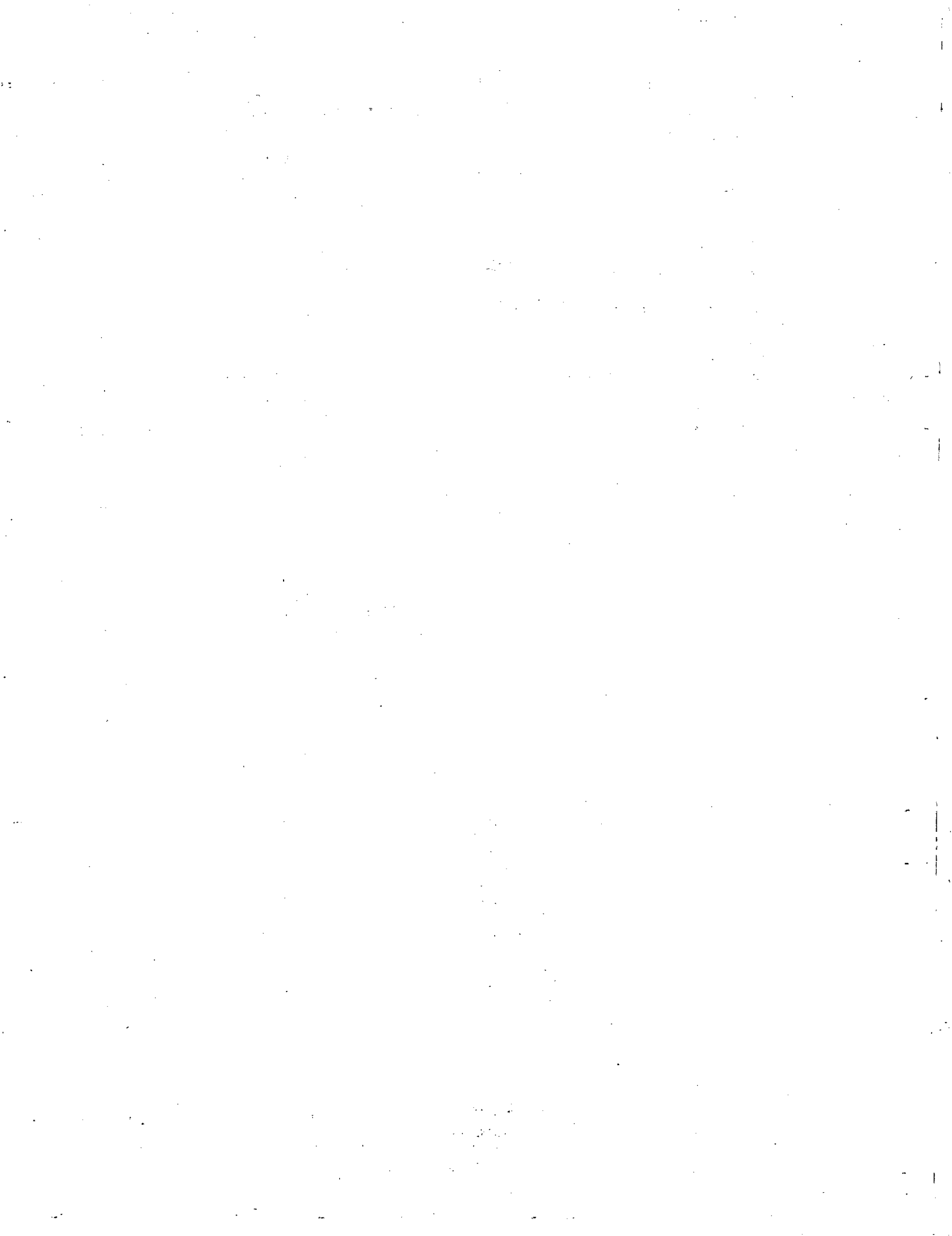


Fig.13 Nomograma para el cálculo de espaciamento de drenes, según la fórmula de Hooghoudt, para los condiciones estimadas para Piura (simplificación del nomograma propuesto por Boumans)



## 6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

A. La comparación de los resultados obtenidos con las tres fórmulas, entre drenes entubados y drenes abiertos, para profundidades de estrato impermeable de 5 m y valores iguales de conductividad hidráulica nos da aproximadamente los mismos valores, lo cual era de esperarse, ya que las tres fórmulas consideran condiciones de flujo paralelo, y en este caso en que  $D < 1/4 L$ , el flujo es esencialmente de este tipo.

La fórmula de Donnan da espaciamentos ligeramente mayores puesto que no considera la existencia de un cierto flujo radial, ya que la fórmula fue derivada para la condición en que los drenes llegan hasta el mismo estrato impermeable, que no es exactamente el caso.

B. Para la situación considerada, en que el estrato impermeable se halla a 30 m de profundidad o sea  $D > 1/4 L$  el flujo de agua hacia los drenes es principalmente de tipo radial razón por la cual la fórmula de Donnan no es aplicable y los espaciamentos que se obtienen pueden resultar excesivos.

Para esta situación se consideran recomendables las formulas de Hooghoudt y Ernst. Entre estas dos nos inclinamos por la de Hooghoudt, puesto que ha sido derivada para casos similares al que se ha asumido o sea: Suelos homogéneos y profundos.

C. Los espaciamentos obtenidos sólo serán aproximadamente satisfactorios, en cuanto al propósito de diseño, lavado de suelos, mantenimiento de un nivel adecuado de salinidad y mantenimiento de la tabla de agua a un nivel que no represente peligro para la agricultura, en la medida que se cumplan las condiciones de diseño en lo que se refiere a requerimientos de agua, profundidad de drenes, manejo y conservación del sistema de drenaje y, sobre todo, una buena evacuación de los excesos de agua de drenaje.

D. En cuanto a la diferencia de espaciamiento entre drenes entubados y drenes abiertos, prácticamente es insignificante lo cual permite la doble utilización de los drenes abiertos en el caso de tener suelos de textura suficientemente pesada que permita construir drenes abiertos con un talud máximo de 1: 1, según el siguiente punto de vista:

Inicialmente se puede construir drenes abiertos para evacuar la gran cantidad de agua de drenaje que va a discurrir hacia los drenes debido a los lavados a que habrá que someter a los suelos salinos y luego, cuando se pruebe que el sistema funciona bien y las consideraciones técnicas lo permitan (principalmente la pendiente del terreno) instalar los tubos de drenaje en la misma zanja.

E. Los espaciamientos menores de 30 m no son económicamente posibles de llevar a cabo, pero felizmente esto es requerido sólo en el 3.6 % del área total del valle. Esta área podría considerarse económicamente marginal para la instalación del drenaje.

Por lo demás se puede considerar que los espaciamientos son económicamente factibles, pues 16.7 % del área requiere de espaciamientos entre 30 y 60 m, 56.4 % del área requiere espaciamientos de drenes entre 60 y 120 m y 19.9 % del área requieren espaciamientos entre 120 y 160 m.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. El espaciamiento de drenes para los suelos del valle Medio y Bajo Piura, en los casos en que el estrato impermeable se encuentre a profundidades mayores a  $1/4$  del espaciamiento entre drenes es recomendable obtenerlo con la fórmula de Hooghoudt y cuando sea menor o igual a  $1/4$  del espaciamiento, las fórmulas de Hooghoudt, Donnan y Ernst son igualmente válidas.

B. En suelos de textura pesada es recomendable construir inicialmente drenes abiertos, para la época de lavado, y luego instalar los tubos de drenaje en las mismas zanjas, para la época de mantenimiento.

En el resto de suelos de textura suelta, principalmente ubicados en la margen derecha del Río Piura, no es económico ni práctico construir drenes abiertos ya que estos requerirían por lo menos un talud 3:1 para evitar la destrucción de sus paredes por acción de las aguas de drenaje. En este tipo de suelos es necesario instalar drenes entubados desde el inicio.

C. Por el carácter teórico de este estudio se requiere experimentar los espaciamientos calculados, a fin de ajustarlos a las condiciones de campo, lo cual se justifica si tenemos en cuenta el alto costo del sistema de drenaje, cuyo éxito depende en gran parte del buen funcionamiento de los drenes de campo. Para ello se requiere instalar un campo experimental donde se pueda controlar cada uno de los elementos de diseño que intervienen en el cálculo de los espaciamientos.

D. Por ninguna razón se debe iniciar un lavado de suelos sin antes contar con un buen sistema de drenaje, pues de lo contrario lo único que se conseguiría sería agravar el problema de drenaje y salinidad.

E. Por las condiciones actuales del valle de Piura se recomienda iniciar el drenaje de inmediato, con la construcción de drenes suficiente-

mente profundos, recomendándose en el presente trabajo 2.8 m de profundidad, en el caso que resulten más profundos que el dren colector, puede bombearse el agua hacia este dren colector, ya que los beneficios económicos que podrían obtenerse justifican esta inversión.

F. En el caso de construir drenes abiertos, se recomienda no iniciar el lavado inmediatamente después de construídos los drenes sino luego que se ha estabilizado la napa freática, aproximadamente a los diez días, de lo contrario el excesivo flujo de agua puede destruir los drenes.

G. Mejorar el régimen de riego, de lo contrario no se podrá mejorar el actual estado de los suelos.

H. Evitar largos períodos de barbecho, sin aplicaciones de riego pues esto facilita el ascenso de las sales conjuntamente con la evaporación de la humedad del suelo.

I. Controlar periódicamente el uso de agua de pozo para evitar la posibilidad de estar aplicando agua altamente salina, inconvenientes para la agricultura.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Aquize Carpio, José. 1966. La salinidad en relación con el drenaje. Simposio de Salinidad, Págs. 2 y 3. Instituto de Ciencias Agrícolas de la O.E.A.
- Arribas L., Carlos A. 1961. Mejoramiento de los suelos salinos en la Hacienda Cumbibira. 30 Págs. Biblioteca del Ing<sup>o</sup> Arturo Cornejo. La Molina, Lima.
- CENDRET. 1966. Primer curso Nacional de Drenaje de Tierras Agrícolas. Tomos II y IV. 200 Págs. Facultad de Ingeniería Agrícola, Univ. Agraria La Molina.
- Donnan, William W.; Bradshaw B. George. 1954. Drainage investigation in Imperial Valley, California. 1941-1951. U.S.DA. Soil Conserves Services Technical Publication 120 American Society of Agricultural.
- Dumm, D. Lee. 1954. Drain spacing Transaction. Engineering Minneapolis October. Págs. 725-730.
- Dagan, Gedcon. 1964. Spacing of drains by aproximate method. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 90 N<sup>o</sup> I R1, part. 1. Proceeding of the American Society of Civil Engineers. 13 Págs.
- Hammad Hammad. 1964. Design of drainage for arid regions. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 90 N<sup>o</sup> I R3, part. 1. Proceedin of the American Society of Civil Engineers. 15 Págs.
- ..... 1957. Third congress on irrigation and drainage. International Commission on Irrigation and Drainage, Vol. III. Págs. 8.1-8.15.
- Israelsen, O.W. y Hansen. 1965. Principios y prácticas del riego. Edit. Reverté, Barcelona. Págs. 225-255.
- Kirkham, Don. 1966. Steady state theories for drainage. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 92 N<sup>o</sup> I R1. Proceedings of

- the American Society of Civil Engineers. 16 Págs.
- Kovda, V.A. y Egorov, V.V. 1958. The application of drainage in the reclamation of salinized soils. Academy of Sciences of U.S.S.R. Transaction from russian, Washington. 225 Págs.
- Luthin, James. 1965. Drainage Engineering. John Wiley and Sons, New York. 250 Págs.
- Luthin, James. 1967. Drenaje de tierras agrícolas. Departamento de Irrigación, Universidad de California, Davis. 680 Págs.
- Pavlore, Patricia. 1967. Arid Lands Research Institutions a World directory. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, U.S.A.
- Roe-Ayres. 1960. Drenaje agrícola para ingenieros. Edit. Omega, Barcelona. 540 Págs.
- Talsma, T. 1963. The control of saline groundwater. Laboratory of Physics and Meteorology, Agricultural Univ. Wageningen, Netherland. 68 Págs.
- Van Beers, W.F.J. 1965. Some nomographs for the calculation of drain spacings. Bulletin Nº 8. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen. 48 Págs.
- Wesseling, J. 1957. The relation between rainfall drain discharge and Depth of water table in the Tile-drained land. Institute for Land and Water Management Research, Wageningen, Netherland. 14 Págs.
- Wesseling, J. 1964. Acomparison of the steady-state drain spacing fórmulas of Hooghoudt and Kirkham in conection with design practice. Institute of Land and Water Management Research, Wageningen, Netherland. Bulletin 34. 14 Págs.

APENDICES



PROGRAMACION DE LAS FORMULAS DE HOOGHOUTD Y ERNST  
EN LENGUAJE FORTRAN II

Teniendo en cuenta que la solución de las ecuaciones de Hooghoudt y Ernst, para el cálculo de los espaciamientos es muy laborioso, más cuando se trata de resolver con diferentes datos como es nuestro caso, en el valle de Piura, se ha creído conveniente procesar los datos usando la computación electrónica en la solución de estas ecuaciones, para lo cual se han seguido los siguientes pasos:

- a. Confección de un diagrama de flujo de cada una de las fórmulas. Figs. 20 y 21
- b. Programación en el Lenguaje Fortran II, cada uno de estos diagramas flujo.
- c. Ejecución del programa Fortran en la Computadora IBM 1620 de la Universidad Agraria de La Molina.

A. Definición de términos:

Diagrama Flujo: Es la representación esquemática de la solución de un problema, utilizando signos convencionales establecidos, de tal manera que la solución quede claramente expuesta en la forma más sencilla y lógica.

Programa Fortran: Es cualquier secuencia de variables y no variables, suscritas o no suscritas y funciones separadas por signos de operación o paréntesis, las cuales siguen reglas estrictas de construcción según el lenguaje que se use. Cada una de estas constituye una sentencia, que son codificadas en tarjetas standards y tratan un aspecto del problema.

B. Programación de las Fórmulas:

B.1 Fórmula de Hooghoudt<sup>5</sup>: Para la solución de esta fórmula es necesario conocer los siguientes factores:



Símbolo en la ecuación (5)	Símbolo utilizado en el Programa Fortran
K	P
$\Delta h$	Q
q	R
$D_0$	D
r	RO

Con los valores de estos factores se siguen los siguientes pasos:

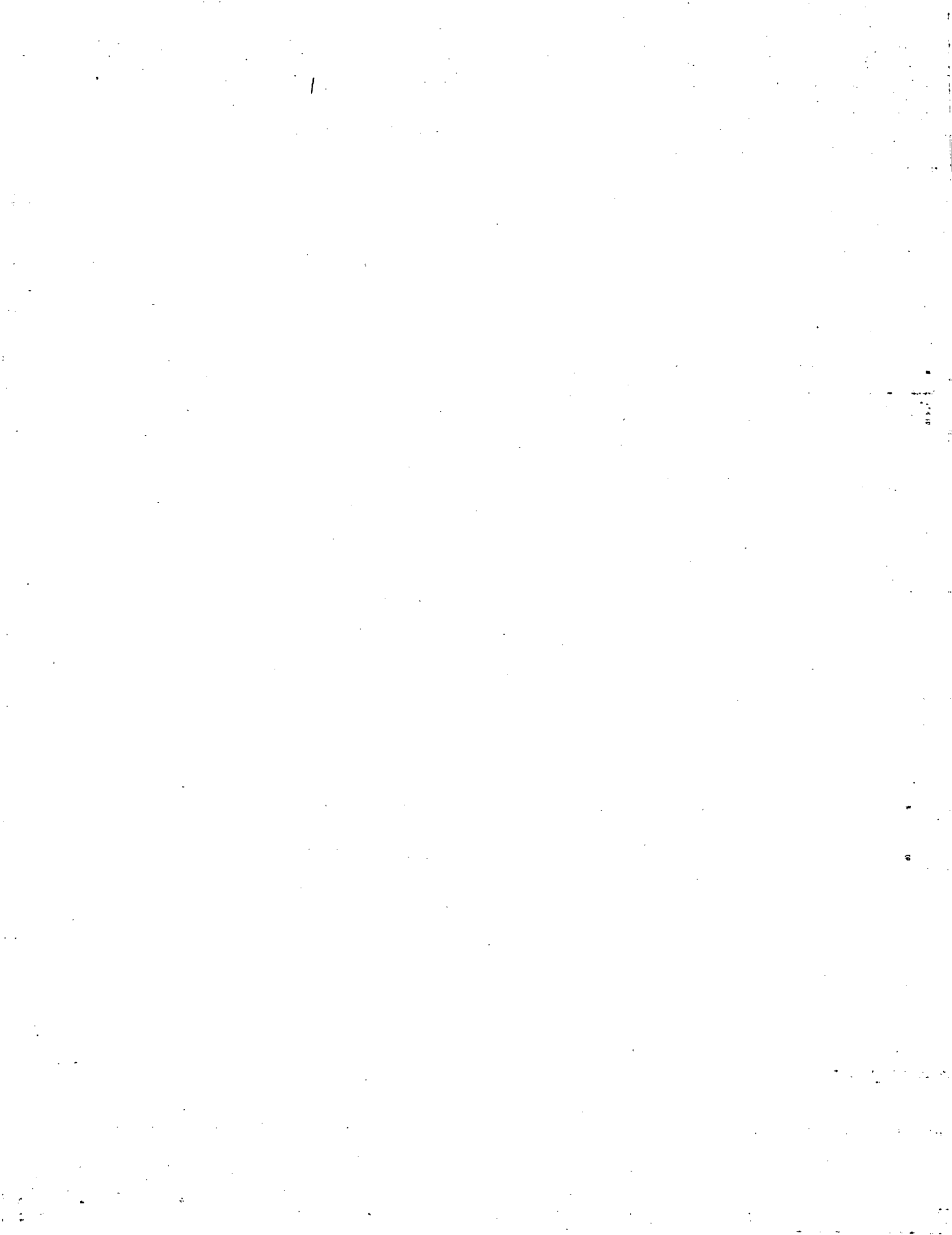
- Suponer un valor de L, que en el Programa Fortran se le ha denominado C, con este valor podemos obtener el valor de d, que en el Programa Fortran se la denominado G, utilizando la fórmula (6)
- Obteniendo el valor de d, calculamos el valor L, que en el Programa Fortran se le ha denominado S para diferenciarlo de C, y será la solución cuando  $C = L$ .
- Los sub-índices I, J, K indican el número de valores por el cual va a ser remplazado el factor al cual se le coloque.

B.2 Fórmula de Ernst: La fórmula de Ernst (8) puede-ser llevada a la siguiente forma:

$$A L^2 + B L + C = 0$$

O sea una ecuación de segundo grado en L, cuya solución exige conocer los siguientes factores:

Símbolo en la ecuación (8)	Símbolo utilizado en el Programa Fortran
q	R
K	P
$D_1$	D
$D_0$	OD
$D_v$	DV



```

C   PROGRAMA FORTRAN DE LA FORMULA DE HOOGHOUDT
   DIMENSION P%7D,S%28D,H%7D,C%28D,G%28D,D%4D,RO%2D,Q%2D
   PUNCH 10
10  FORMAT%58HTABLA 12 ESPACIAMIENTO DE DRENES CALCULADOS CON LA FORMU
   1LA/19HDE HOOGHOUDT%1940D./58HDRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERME
   2ABLE SUPERFICIAL%5M.D./6X,1HK,7X,13HPORCENTAJE DE,5X,8HL%ASUM.D,6
   3X,1HD,6X,8HL%CALC.D/14X,12HAREA CON VA-,9X,2HM.,19X,2HM./14X,14HLC
   4RES DE K1*K2/D
   READ 20,P%1D,P%2D,P%3D,P%4D,P%5D,P%6D,P%7D
20  FORMAT%7F7.3D
   READ 12,H%1D,H%2D,H%3D,H%4D,H%5D,H%6D,H%7D
12  FORMAT%7F5.1D
   READ 13,D%1D,D%2D,D%3D,D%4D,RO%1D,RO%2D,Q%1D,Q%2D
13  FORMAT%4F5.2,4F5.2D
   J#1
   K#1
100 AB#D%J#/%3.1416*RO%K#D
   A#2.5*D%J#*LOGF%AB#
   I#0
70  I#I&1
   C%I#10.
40  B#A/C%I#&1.
   G%I#D%J#/B
   R#0.005
   S%I#*SQRTF%%4.*P%I#*Q%K#**2D%G%,*P%I#*G%I#*Q%K#D#D/R#
   IF%S%I#-C%I#D50,50,30
30  C%I#*C%I#&1.
   GO TO 40
50  PUNCH 11C,P%I#,H%I#,C%I#,G%I#,S%I#
110 FORMAT%F10.3,7X,F10.1,5X,F5.,5XF6.1,5X,F7.2D
   IF%I-7D70,60,60
60  IF%J-1D620,80,620
80  PUNCH 130
130 FORMAT%/55HDRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.
   1D/D
   J#J&1
   GO TO 100
620 IF%J-2D200,300,200
300 PUNCH 400
400 FORMAT%/56HDRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M
   1.D/D
   J#J&1
   K#K&1
   GO TO 100
200 IF%J-3D600,600,500
600 PUNCH 700
700 FORMAT%/54HDRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.D
   1/D
   J#J&1
   GO TO 100
500 PUNCH 800
800 FORMAT%/38HPROGRAMADO POR ABELARDO DE LA TORRE V.D
   STOP
   END

```

0.025	0.150	0.500	1.500	3.000	6.000	10.000	
2.3	27.3	2.4	27.4	0.10	0.32	0.7	0.6
2.3	27.3	2.4	27.4	0.10	0.32	0.7	0.6

TARLA 12 ESPACIAMIENTO DE DRENES CALCULADOS CON LA FORMULA DE HOOGHOUTD%1940B.

DRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M.00

K	PORCENTAJE DE AREA CON VALORES DE K1-K2	L%ASUM.00 M.	D	L%CALC.00 M.
.025	0.0	10.	1.0	6.31
.150	.2	18.	1.4	17.17
.500	3.4	35.	1.7	34.15
1.500	16.7	63.	1.9	62.11
3.000	24.7	90.	2.0	89.62
6.000	31.5	129.	2.1	128.64
10.000	19.9	168.	2.1	167.44

DRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.00

.025	0.0	10.	.8	5.83
.150	.2	18.	1.5	17.73
.500	3.4	48.	3.7	47.71
1.500	16.7	115.	7.4	114.69
3.000	24.7	192.	10.5	191.39
6.000	31.5	308.	13.7	307.52
10.000	19.9	428.	15.9	427.22

DRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M.00

.025	0.0	10.	1.5	6.71
.150	.2	18.	1.8	17.63
.500	3.4	34.	2.0	33.80
1.500	16.7	61.	2.2	60.12
3.000	24.7	86.	2.2	85.90
6.000	31.5	123.	2.3	122.42
10.000	19.9	159.	2.3	158.70

DRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.00

.025	0.0	10.	1.1	5.91
.150	.2	19.	2.1	18.67
.500	3.4	51.	5.0	50.61
1.500	16.7	119.	9.4	118.42
3.000	24.7	193.	12.6	192.81
6.000	31.5	304.	15.7	303.61
10.000	19.9	417.	17.7	416.36

PROGRAMADO POR ABELARDO DE LA TORRE V.

```

C PROGRAMA FORTRAN DE LA FORMULA DE ERNST
DIMENSION P%7, S%28, H%7, A%28, W%28, B%28, C%28, D%4, OD%4
400 CONTINUE
READ 20, P%1, P%2, P%3, P%4, P%5, P%6, P%7
20 FORMAT%7F7.3
READ 13, H%1, H%2, H%3, H%4, H%5, H%6, H%7
13 FORMAT%7F5.1
READ 14, D%1, D%2, D%3, D%4, OD%1, OD%2, OD%3, OD%4
14 FORMAT%8F6.2
PUNCH 10
10 FORMAT%59HTABLA 13. ESPACIAMIENTO DE DRENES CALCULADOS CON LA FORMULA/15HDE ERNST%1954.//58HDRENES ENTUBADOS, CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M.//4X, 1HK, 4X, 13HPORCENTAJE DE, 5X, 1HA, 9X, 1HB, 9X, 13HC, 5X, 4HL%M/9X, 12HAREA CON VA-/9X, 14HLORES DE K1-K2/
J#1
U#0.8
Q#0.7
100 BA#OD%J/U
500 I#0
70 I#I&1
DV#0.8
R#0.005
A%I#R/%8.*P%1#D%J
B%I#R/%3.1416*P%1#LOGF%BA
C%I#R#DV/P%I-Q
S%I#%-B%I#SQRTF%#E%I#*2#-#4.*A%I#*C%I#/#2.*A%I#
PUNCH 110, P%1, H%1, A%1, B%1, C%1, S%1
110 FORMAT%1X, F7.3, 5X, F5.1, 5X, F9.7, 1X, F9.6, 1X, F8.5, 1X, F7.2
IF%I-7#70, 90, 90
90 IF%J-1#120, 80, 120
80 PUNCH 130
130 FORMAT%//56HDRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M.
1.#/
J#J&1
Q#0.6
GO TO 100
120 IF%J-2#140, 150, 140
150 PUNCH 160
160 FORMAT%//55HDRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.
1.#/
J#J&1
Q#0.7
200 BA#1./U
GO TO 500
140 IF%J-3#170, 180, 170
180 PUNCH 190
190 FORMAT%//54HDRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.#
1/
J#J&1
Q#0.6
GO TO 200
170 PUNCH 300
300 FORMAT%//38HPROGRAMADO POR ABELARDO DE LA TORRE V.#
GO TO 400
END
0.025 0.150 0.500 1.500 3.000 6.000 10.000
0.0 0.2 3.4 16.7 24.7 31.5 19.9
2.65 2.70 27.65 27.70 2.30 2.40 27.3 27.40

```

Símbolo en la ecuación (8)	Símbolo utilizado en el Programa Fortran
U	U
$\Delta h$	Q

Conociendo los valores de cada uno de estos factores, se siguen los siguientes pasos para la solución:

- a. Determinar el valor de  $w$  según los casos I y II mencionados en las páginas 58 y 61.
- b. Conocido qué valor debe tener  $w$ , se resuelve la ecuación de segundo grado en  $L$ , y se tendrá dos posibles valores por los 2 signos del término radical, uno de los cuales resultará negativo, que será el que corresponda al término radical negativo. Por ello en la Programación sólo se usa el término radical positivo.

TABLA 13. ESPACIAMIENTO DE DRENES CALCULADOS CON LA FORMULA DE ERNST%1954□.

DRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M.□.

K	PORCENTAJE DE AREA CON VALORES DE K1-K2	A	B	C	L%M□
.025	0.0	.0094339	.067230	-.54000	4.79
.150	.2	.0015723	.011205	-.67333	17.43
.500	3.4	.0004716	.003361	-.69200	34.90
1.500	16.7	.0001572	.001120	-.69733	63.12
3.000	24.7	.0000786	.000560	-.69866	90.77
6.000	31.5	.0000393	.000280	-.69933	129.86
10.000	19.9	.0000235	.000168	-.69960	168.70

DRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE SUPERFICIAL%5M.□

.025	0.0	.0092592	.069939	-.44000	4.08
.150	.2	.0015432	.011656	-.57333	15.86
.500	3.4	.0004629	.003496	-.59200	32.18
1.500	16.7	.0001543	.001165	-.59733	58.55
3.000	24.7	.0000771	.000582	-.59866	84.38
6.000	31.5	.0000385	.000291	-.59933	120.91
10.000	19.9	.0000231	.000174	-.59960	157.21

DRENES ENTUBADOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.□

.025	0.0	.0009041	.014205	-.54000	17.81
.150	.2	.0001506	.002367	-.67333	59.44
.500	3.4	.0000452	.000710	-.69200	116.11
1.500	16.7	.0000150	.000236	-.69733	207.40
3.000	24.7	.0000075	.000118	-.69866	296.75
6.000	31.5	.0000037	.000059	-.69933	423.06
10.000	19.9	.0000022	.000035	-.69960	548.52

DRENES ABIERTOS CON ESTRATO IMPERMEABLE PROFUNDO%30M.□

.025	0.0	.0009025	.014205	-.44000	15.57
.150	.2	.0001504	.002367	-.57333	54.36
.500	3.4	.0000451	.000710	-.59200	106.93
1.500	16.7	.0000150	.000236	-.59733	191.56
3.000	24.7	.0000075	.000118	-.59866	274.37
6.000	31.5	.0000037	.000059	-.59933	391.42
10.000	19.9	.0000022	.000035	-.59960	507.69

PROGRAMADO POR ABELARDO DE LA TORRE V.

