

408/1178 20340/788
LE...
INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO
SUBGERENCIA DE INVESTIGACION
DIVISION DE INGENIERIA AGRICOLA
PROGRAMA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA

CURSO DE RIEGO Y DRENAJE

PARAMETROS HIDRODINAMICOS USADOS EN RIEGO Y DRENAJE
(SEGUNDA PARTE)

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

POR: J. ANTONIO FORERO S.

Tibaitatá, Mayo de 1977

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

Por: José Antonio Forero S.⁺

INTRODUCCION

El conocimiento de la conductividad hidráulica de un suelo es de gran importancia cuando se estudia el flujo de agua en el suelo. En el campo del drenaje, la conductividad hidráulica del suelo es quizá el factor predominante en la determinación de profundidades y espaciamientos apropiados de drenes subsuperficiales. De la habilidad de los suelos para transmitir agua depende el funcionamiento de drenes y pozos de drenaje.

Muchas y avanzadas teorías existen acerca del fenómeno de conductividad hidráulica, sin embargo, se cuenta con métodos sencillos de campo y laboratorio para su medición. Para lograr éxito en un estudio de drenaje, es de gran importancia utilizar adecuadamente los resultados de estas mediciones de manera que se puedan lograr diseños apropiados de los sistemas de drenaje.

La presente discusión estará encaminada a revisar en forma breve algunos conceptos básicos para la determinación de la conductividad hidráulica, mediante el uso de los métodos más sencillos y convencionales.

⁺ I.A. M.S. Director Nacional Programa de Desarrollo de Recursos de Agua y Tierra. ICA. Tibaitatá.

GENERALIDADES

Para fines de estudios de Ingeniería de Drenaje, es conveniente hacer una breve distinción entre los conceptos de permeabilidad y conductividad hidráulica del suelo.

La permeabilidad se define como la cualidad o estado de un medio poroso, relativa a la facilidad con la cual tal medio conduce o transmite agua. Como puede observarse, esta es una definición cualitativa y para buscar la aplicabilidad del fenómeno, es necesario explicar la permeabilidad desde el punto de vista físico. La ley de Darcy en una dimensión (1), es de gran utilidad para explicar el fenómeno:

$$Q = - \frac{k' \cdot g \rho}{\eta} \cdot \frac{dH}{dl} \cdot A \quad (1)$$

Donde:

Q = Volumen de flujo por unidad de tiempo

k' = Permeabilidad intrínseca

g = Aceleración debida a la gravedad

ρ = Densidad del fluido

η = Viscosidad del fluido

dH/dl = Gradiente hidráulico en forma diferencial

A = Area de la sección transversal de flujo.

Resolviendo la ecuación (1) para k' se tiene:

$$k' = Q \frac{\eta}{\rho g} \frac{1}{dH/dl} \frac{1}{A} \quad (2)$$

En esta forma las dimensiones de la permeabilidad intrínseca k' pueden resumirse así:

$$k = \frac{d}{\mu} (L^3 T^{-1}) (M L^{-1} T^{-1}) (M^{-1} L^3) (L^{-1} T^2) (L^{-2}) \frac{d}{\mu} L^2 \quad (3)$$

La permeabilidad intrínseca expresada en (2), tiene la propiedad de ser independiente del fluido usado para hacer la medición. Sin embargo las dimensiones de la permeabilidad intrínseca (3), no son muy apropiadas para ser usadas en trabajos de ingeniería. Para obviar esta dificultad se ha introducido un nuevo término: la conductividad hidráulica k . Este parámetro tiene las dimensiones de velocidad $L T^{-1}$, y puede expresarse en cm/seg, m/día etc.

En drenaje agrícola el fluido es agua y puede asumirse que la densidad es 1. Se sabe sin embargo, que la velocidad del recorrido del agua a través del suelo, varía sustancialmente con la temperatura debido a que esta afecta la viscosidad del agua. El grado de resistencia a fluir que tenga el agua se denomina viscosidad de la misma. La viscosidad del agua puede expresarse en dinas segundo/cm² ó "Poise". Puesto que la viscosidad del agua a 20°C se aproxima a 1 "centipoise", es conveniente referenciar las mediciones de conductividad hidráulica a esta temperatura por medio de la relación:

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = k_{x^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{\eta_{x^{\circ}\text{C}}}{\eta_{20^{\circ}\text{C}}} \quad (4)$$

De acuerdo con todo lo anteriormente expuesto, la ecuación de Darcy puede expresarse:

$$Q = k I A \quad (5)$$

Donde:

Q = Descarga por unidad de tiempo. $L^3 T^{-1}$

k = Conductividad hidráulica. $L T^{-1}$

I = Gradiente hidráulico. Adimensional

A = Area de la sección transversal. L^2

Son muchas las ecuaciones que para el cálculo de profundidad y espaciamento de drenes subsuperficiales ofrece la literatura científica y en todas ellas la conductividad hidráulica del suelo juega un papel de vital importancia.

ALGUNOS METODOS PARA DETERMINAR CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

Existen varios métodos de campo y laboratorio para determinar la conductividad hidráulica del suelo. La presente discusión solo cubrirá algunos métodos que pueden destacarse por su fácil procedimiento y/o aplicabilidad en drenaje agrícola. Estos métodos son: uso de permeámetros de cabeza constante y variable, y el método del pozo barrenado. Los dos primeros son métodos de laboratorio y el tercero es de medición directa en el campo.

Método del permeámetro de cabeza constante

Para fines de estudios de drenaje agrícola, conviene que las determinaciones de conductividad hidráulica por medio de permeámetros, se efectúen con muestras de suelo no disturbadas. Estas muestras no disturbadas pueden obtenerse utilizando el mismo tipo de muestreador que se emplea en el muestreo de suelos para retención de humedad. Dada la naturaleza de estas mediciones por medio de permeámetros, la información obtenida es más fácil de usar en investigaciones por encima del nivel freático.

El empleo del permeámetro de cabeza constante, no se recomienda para suelos pesados puesto que se necesitaría considerable tiempo para observar los incrementos en el volumen de agua que pasa a través de la muestra de suelo.

El procedimiento empleado puede resumirse así:

1. En un anillo de unos 2 cms de altura y del mismo diámetro del cilindro interior del muestreador de suelos, provisto de una malla adecuada en su parte inferior, coloque una caja de arena de manera que llene completamente el anillo.
2. Saque el cilindro interior del muestreador conjuntamente con la muestra

de suelo y sature el suelo.

3. Coloque el cilindro con la muestra del suelo, sobre el anillo que contiene la arena, de manera que entre las dos capas (arena y suelo) se haga un perfecto contacto.
4. Mida la longitud y sección transversal de la muestra de suelo (cm)
5. Selle exteriormente las dos unidades anteriores por medio de cinta o impermeabilizante adecuado.
6. Sobre el cilindro que contiene el suelo, coloque el cilindro que va a contener la lámina de agua. Selle estas dos unidades como en el caso anterior.
7. Agregue agua y remueva el aire usando una pequeña varilla. Mida la altura de la lámina de agua (cm).
8. Conecte el abastecimiento de agua al permeámetro
9. Luego de que se establezca el equilibrio tome todas las lecturas necesarias para determinar la conductividad hidráulica. En cada lectura anote el volumen recolectado en el recipiente y el tiempo respectivo.
10. Encuentre el tiempo promedio en horas y el volumen promedio en cm^3 .
11. Halle el valor de conductividad hidráulica por medio de la fórmula:
(Ver Figura 1).

$$k = \frac{V \cdot L}{t \cdot A \cdot H} \quad (6)$$

Donde:

k = Conductividad hidráulica en cm/hr

V = Volumen promedio de agua recolectada, en cm^3

- L = Longitud de la muestra de suelo, en cm.
 t = Tiempo promedio en hr.
 A = Sección transversal de la muestra de suelo en cm²
 H = Pérdida de cabeza hidráulica.

12. Tome la temperatura del agua y ajuste k (4)

Método del permeámetro de cabeza variable

El procedimiento empleado es en esencia similar al caso anterior, con la diferencia de que aquí la cabeza hidráulica varía con el tiempo.

Para el cálculo de la conductividad hidráulica, utilice la siguiente expresión: (Ver Figura 2)

$$k = \frac{a L}{A (t-t_0)} \ln\left(\frac{H_0}{H}\right) \quad (7)$$

Donde:

- k = Conductividad hidráulica en cm/hr.
 a = Area del tubo de abastecimiento, cms²
 L = Longitud de la muestra de suelo, cm.
 A = Sección transversal de la muestra de suelo, cms²
 H₀ = Cabeza hidráulica (cms) a tiempo t₀(hr).
 H = Cabeza hidráulica (cms) a tiempo t (hr).

Como en el caso anterior conviene tomar la temperatura del agua y ajustar k.

El método del permeámetro de cabeza variable es recomendado para suelos de baja permeabilidad. Según el diámetro del tubo de abastecimiento de agua puede o no ser necesario corregir por capilaridad las lecturas de cabeza

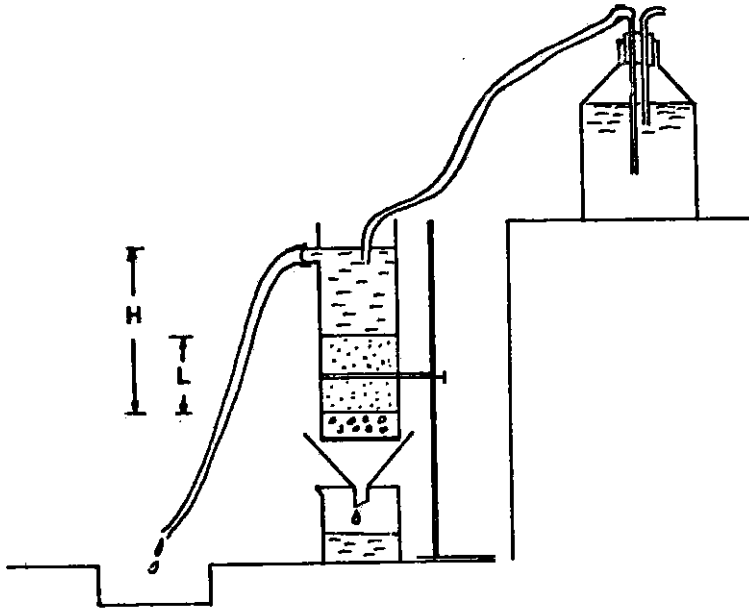


FIG. No. -1- PERMEAMETRO DE CABEZA CONSTANTE.

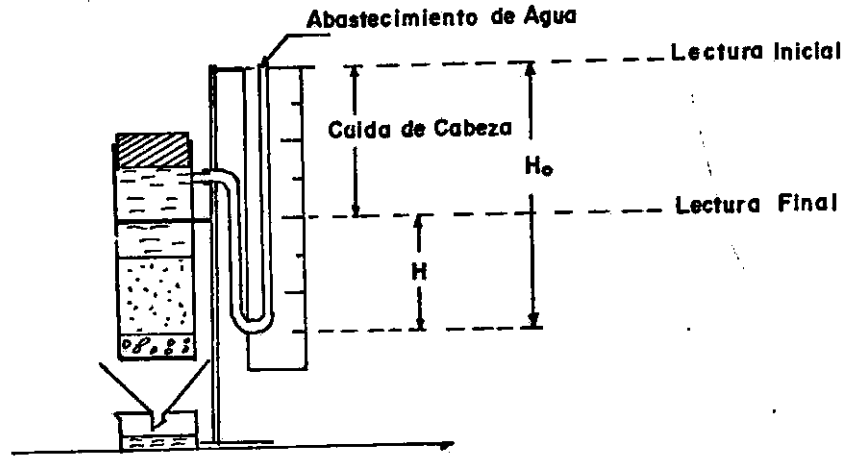


FIG.No. - 2 - PERMEAMETRO DE CABEZA VARIABLE.

hidráulica.

Método del pozo barrenado

La determinación de conductividad hidráulica por los métodos de laboratorio presenta la desventaja de ser poco representativa debido al tamaño de la muestra de suelo. Esto puede conducir a errores significativos en especial cuando en la pequeña muestra hay presencia de rocas y raíces. Conviene entonces acudir al empleo de métodos de campo que ofrezcan mayor confiabilidad. Uno de los métodos de campo de mayor aceptación, es el método del pozo barrenado.

Se trata de un método relativamente simple. Por medio de un barrenado se perfora un pozo hasta una profundidad entre 60 y 90 cms. por debajo del nivel freático o equivalente a 5 - 10 veces el diámetro del pozo. Luego de perforado el pozo se debe permitir que el nivel del agua en el pozo alcance equilibrio estático con el nivel freático. Conseguido este equilibrio se extrae agua del pozo en el menor tiempo posible, hasta que quede casi completamente vacío. En este momento se inician las lecturas de recuperación del nivel de agua en el pozo, a diferentes intervalos de tiempo. Estos intervalos de tiempo pueden iniciarse con 10 segundos más o menos e ir aumentando progresivamente si es necesario, según el suelo. Por su naturaleza, esta recuperación del nivel freático es una medida de la conductividad hidráulica del suelo, primordialmente en dirección horizontal, la cual puede diferir de la dirección vertical.

En la Figura 3 se puede observar un diagrama del pozo barrenado.

Las mediciones de campo no es necesario que se lleven a efecto hasta la

total recuperación de nivel de agua en el pozo. Maasland and Haskew (1957), encontraron buena consistencia en mediciones hasta el 20% de recuperación del total de agua extraída del pozo. Esto quiere decir que k puede calcularse para valores de " y " tales que $0.8 y_0 \leq y \leq y_0$, donde y_0 denota la profundidad por debajo del nivel freático a que queda el nivel de agua en el pozo inmediatamente después de la extracción, o sea para $t = 0$.

The Bureau of Reclamation recomienda el siguiente procedimiento para la determinación de la conductividad hidráulica de un suelo por medio del método del pozo barrenado:

El pozo debe perforarse lo mas verticalmente posible y cepillarse las paredes para evitar el efecto de "sellado". Puede evitarse la entrada de suelo, etc., a través del fondo del pozo, depositando y apisonando bien algún material para que actúe como rejilla. Luego de que se obtenga la condición de equilibrio estático, debe registrarse el nivel del agua y medirse cuidadosamente h y H .

Las mediciones de recuperación del nivel freático a diferentes intervalos de tiempo, pueden efectuarse usando una tabla pequeña con trípode (Figura 3), o simplemente por medio de un flexómetro provisto de un flotador en su extremo. En el primer caso, del cual nos ocuparemos, los registros se hacen sobre una cinta de papel que debe adherirse a la tabla.

Luego de haber marcado sobre la cinta el nivel freático en equilibrio (con la ayuda del flotador y una señal en la cuerda), se retira el flotador y se procede a extraer el agua del pozo. Esta operación debe tomar el menor tiempo posible e inmediatamente debe regresarse el flotador de manera que se pueda registrar la lectura inicial del nivel del agua. En este instante

se debe poner a funcionar el cronómetro para continuar registrando sobre la cinta los diferentes valores de recuperación, para los intervalos de tiempo escogidos. Las mediciones se continúan hasta que se observe sobre la cinta de registro que se ha alcanzado el nivel $0.8 y_0$, lo cual significa que el pozo ha recuperado el 20% de la lámina de agua extraída. Debe indicarse sobre la cinta el registro final.

El diámetro del pozo no es igual al del barrenado debido principalmente a que el pozo puede fácilmente sufrir erosión durante la perforación. En esta forma la sección transversal del pozo puede ser irregular y diferente a diferentes profundidades. Si para la extracción de agua del pozo se usa un recipiente cilíndrico, puede estimarse el diámetro promedio del pozo de acuerdo con la siguiente relación:

$$\pi r_1^2 L = \pi r^2 y_0 \quad (8)$$

$$\therefore r = r_1 \sqrt{L/y_0}$$

Donde:

- r_1 = Radio del recipiente cilíndrico, cms
- L = Lámina de agua en el recipiente, cms
- r = Radio promedio del pozo, cms
- y_0 = Profundidad del nivel del agua en el pozo (cm), a tiempo igual a cero.

Para el cálculo de la conductividad hidráulica pueden seguirse los pasos que se describen a continuación:

- En papel aritmético prepare una gráfica que represente el tiempo en segundos en las abscisas y los valores de "y" en cms. en las ordenadas

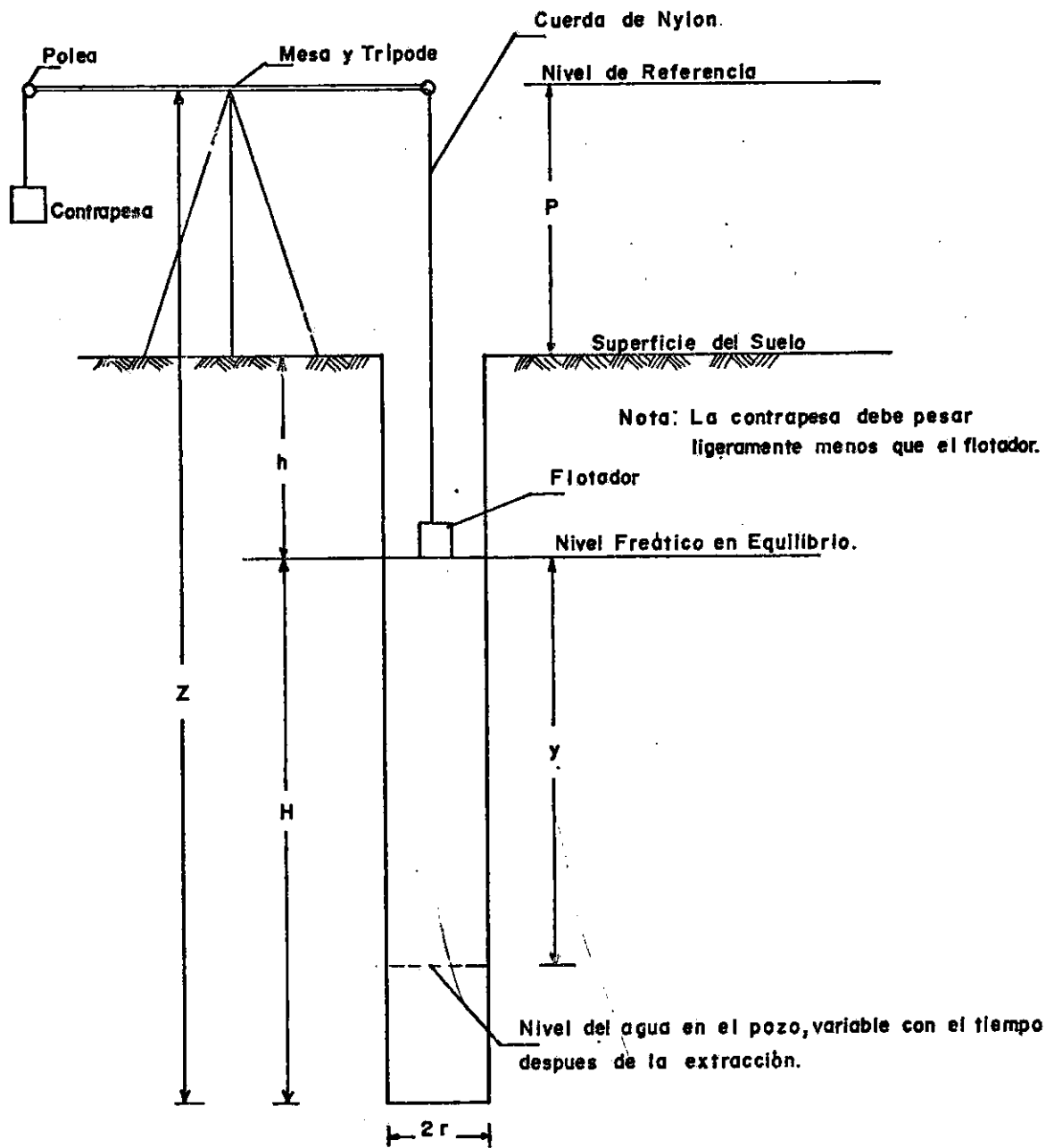


FIG. N.º 3 - DIAGRAMA DEL POZO BARRENADO PARA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.

(Ver Figura 4). Al preparar esta gráfica seleccione escalas convenientes, de manera que la línea tenga una inclinación de aproximadamente 45° .

- De la gráfica encuentre y_0 para $t = 0$
- Encuentre el valor $0.8y_0$. Este valor indica el límite de registro necesario en la gráfica.
- Encuentre la pendiente de la línea: $\Delta y/\Delta t$
- Encuentre el valor de r y de $\frac{H}{r}$
- Calcule $\bar{y} = \frac{y_0 + 0.8y_0}{2}$
- Calcule \bar{y}/r
- De la fórmula:

$$k = C \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (9)$$

C puede encontrarse de las Figuras 5 ó 6, según que el fondo del pozo esté sobre la barrera o por encima de ella.

Si el suelo es estratificado, la determinación de la conductividad hidráulica puede llevarse a cabo en dos o más pasos. Se perfora el pozo hasta la primera profundidad deseada y se sigue el proceso descrito anteriormente. El pozo se perfora a la segunda profundidad y se repite el proceso. Sucesivamente debe continuarse la operación hasta llegar a la profundidad total deseada. Se calculan como en el caso anterior las conductividades hidráulicas para el pozo completo a cada profundidad. Para encontrar la conductividad hidráulica de un estrato en particular, puede utilizarse la siguiente fórmula: (Ver Figura 7).

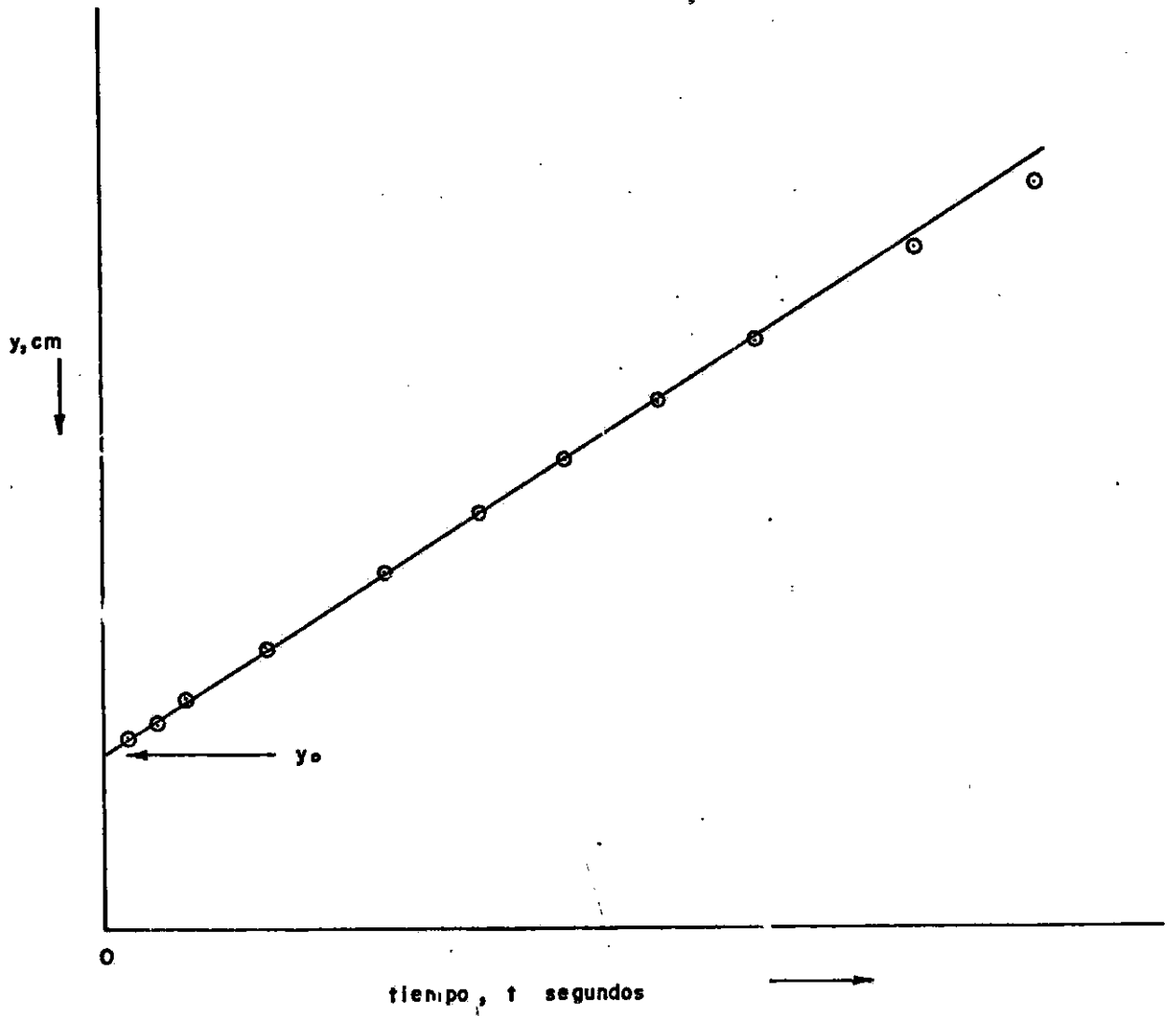


FIG. No 4 - GRAFICA DE y vs t PARA UNA PRUEBA DEL POZO BARRENADO.

$$k_{xn} d_n = k_n D_n - k_{n-1} D_{n-1} \quad (10)$$

Donde:

k_{xn} = Conductividad hidráulica a determinarse

k_n = Conductividad hidráulica medida en la última prueba

k_{n-1} = Conductividad hidráulica medida en la anterior a la última prueba.

d_n = Espesor del estrato n

D_n = Profundidad total de la prueba n desde el nivel estático del agua.

D_{n-1} = Profundidad total desde el nivel estático de agua para la prueba n-1

n = Número de prueba de estrato.

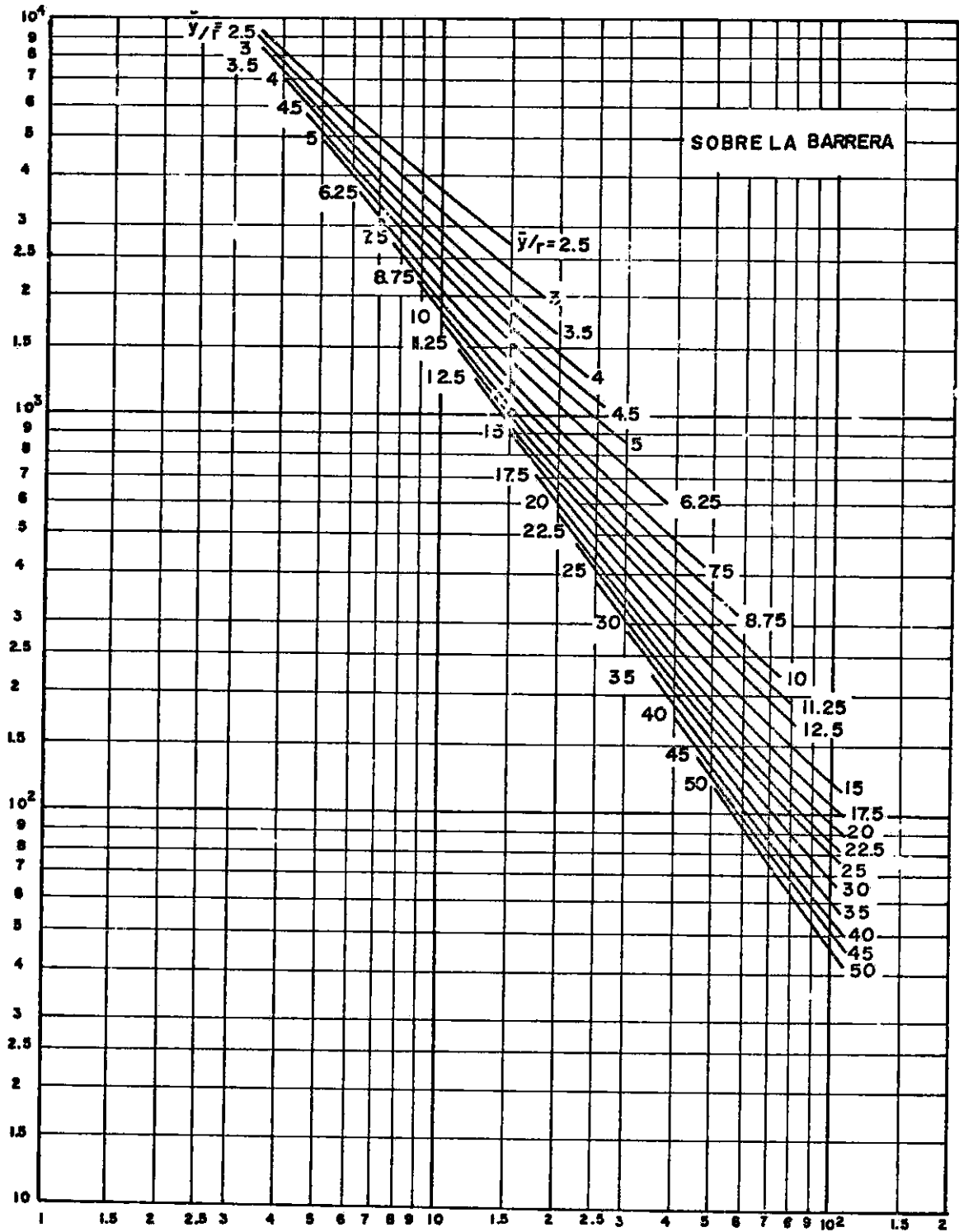


FIG. No. 5 - VALORES DE C vs H/r PARA VARIOS VALORES CONSTANTES DE \bar{y}/r .
 MAASLAND AND HASKEW (1.957)

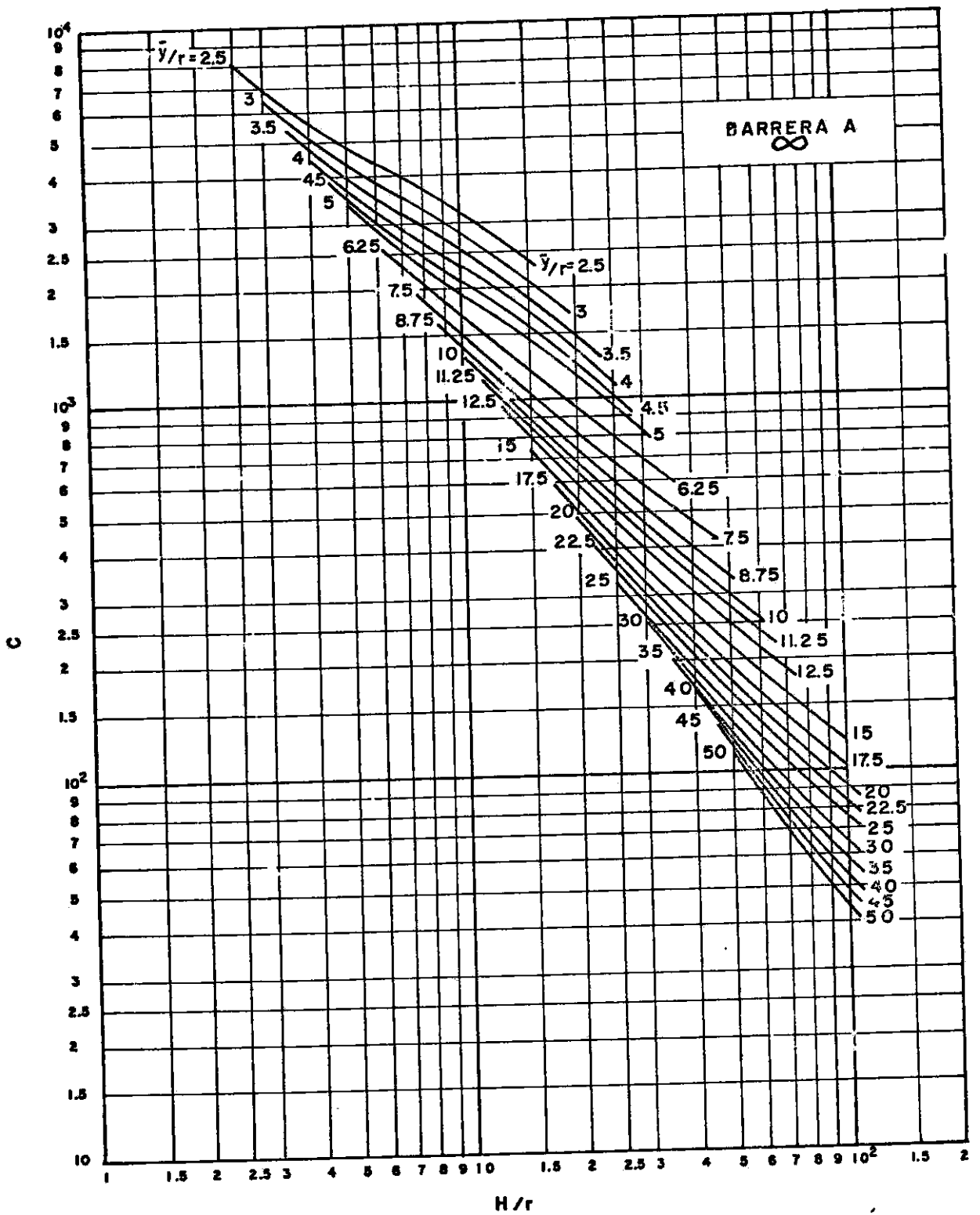


FIG.No.6 - VALORES DE C vs H/r PARA VARIOS VALORES CONSTANTES DE \bar{y}/r
 MAASLAND AND HASKEW (1.957)

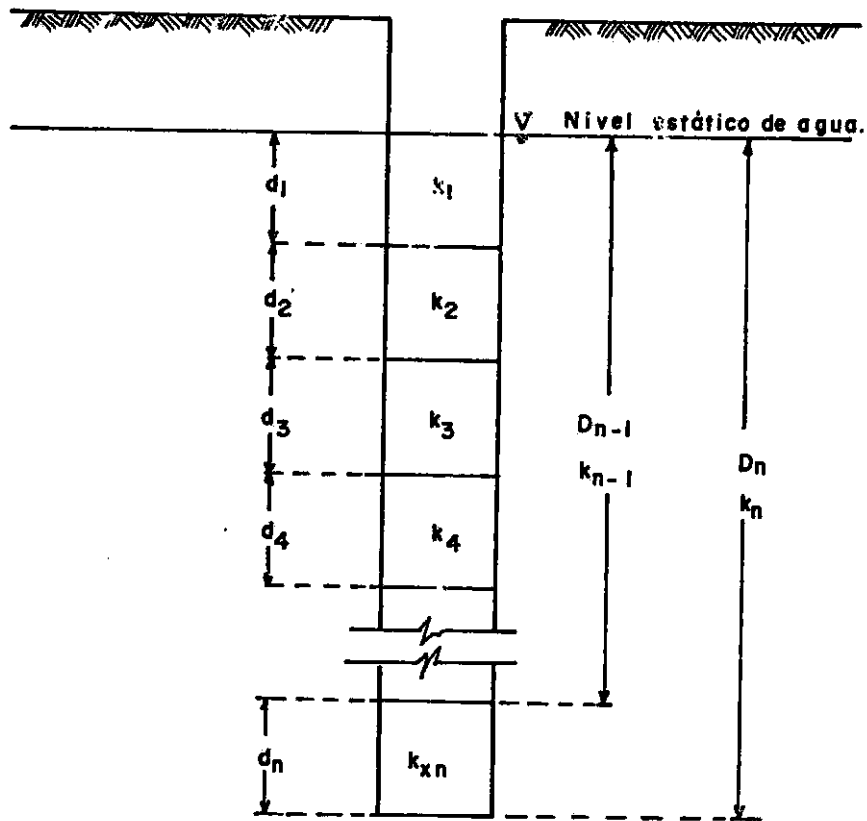


FIG. N.º 7 - PRUEBA DEL POZO BARRENADO EN ETAPAS.

9/21/73
D E

REFERENCIAS

1. LUTHIN, James N. 1966. Drainage Engineering. Wiley U.S.A.
2. WALAND, M. and H.C. HASKEW. 1957. The Auger Hole Method of Measuring the Hydraulic Conductivity of Soil and its Application to Tile Drainage Problems.
3. U.S. BUREAU OF RECLAMATION. 1964. Land Drainage Techniques and Standards. Part 524. Denver. U.S.A.
4. U.S.D.A. 1973. Drainage of Agricultural Land. Port Washington, New York. U.S.A.