

LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
DE ALGUNOS DE LOS PRINCIPALES SUELOS AGRÍCOLAS CUBANOS
Y SU RELACIÓN CON EL DRENAJE

LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE
DE QUELQUES UNS DES PRINCIPAUX SOLS AGRICOLES CUBAINS
ET LEURS RAPPORTS AVEC LE DRAINAGE.

J.L. ENRIQUEZ SALGUIERO, P. ALVAREZ

RESUMEN

A través de los estudios de las condiciones de drenaje de algunos de los más importantes suelos agrícolas del país se obtuvieron los valores que caracterizan la conductividad hidráulica de estos. Para la estimación de esta propiedad se utilizaron los métodos de campo de mayor uso: Hoyo de Barrena (Auger Hole o método de Hooghoudt) en presencia de manto freático y el inverso del Hoyo de Barrena (método de Porchet) en ausencia de este. Según la clasificación Genética de los Suelos de Cuba, año 1979; los suelos Ferráticos y Ferralíticos típicos presentan los mayores valores (30m/día), disminuyendo progresivamente en los diferentes tipos de los suelos ferralíticos de acuerdo con el grado de evolución en los ferralíticos los valores son medios (0.5 a 1.0 m/día) y bajos en los Pardos (0.01-0.10 m/día); siendo prácticamente impermeables los suelos oscuros Plásticos e hidromórficos (0.001 m/día). De acuerdo con estos datos se establecieron las categorías de drenaje y las posibilidades generales de mejoramiento con drenaje superficial o subsuperficial de cada agrupamiento de suelo, siendo de gran valor en la práctica agrícola el uso de las mismas como indicador general del movimiento del agua en el suelo.

Como criterio de clasificación para el establecimiento de las categorías se utilizó la experiencia de la Escuela Holandesa y Norteamericana para el drenaje agrícola de los suelos.

RÉSUMÉ

En étudiant les conditions de drainage de quelques uns des plus importants sols agricoles du pays, on a obtenu les valeurs qui caractérisent leur conductivité hydraulique. Pour évaluer cette propriété, on a utilisé les méthodes de terrain les plus répandues : la tarière (ou méthode de Hooghoudt) en présence d'une nappe phréatique et l'inverse de la tarière, la méthode de Porchet, en l'absence de nappe phréatique. D'après la classification génétique des sols de Cuba de 1979, les sols ferrugineux et ferrallitiques typiques ont les valeurs les plus fortes (30 m par jour) qui diminuent progressivement dans les différents types de sols ferrallitiques, selon le degré d'évaluation. Dans les sols ferrallitiques, les valeurs sont moyennes (0,5 à 1,0 m/jour) et faibles dans les sols bruns (0,01 - 0,10 m/jour) ; ces vertisols et les sols hydromorphes (0,001 m/jour) étant pratiquement imperméables. Conformément à ces données, on a établi les catégories de drainage et les possibilités générales d'amélioration de chaque groupe de sols par drainage superficiel ou subsuperficiel, l'utilisation de ces catégories étant d'un grand intérêt en agriculture pour montrer le mouvement de l'eau dans le sol.

Comme critères de classification pour l'établissement des catégories, on a eu recours à l'expérience des Ecoles Hollandaise et Américaine pour le drainage agricole des sols.

La conductividad hidráulica, unas veces llamada permeabilidad y otros coeficientes de filtración es una de las propiedades físicas del suelo más importantes y difícil de estimar con precisión, (Herrera, 1978).

La importancia radica en el uso que se le da en los cálculos de los trabajos relacionados con la construcción, instalación y explotación de los sistemas de riego y drenaje, el mejoramiento de los suelos y el bombeo del agua subterránea con diferentes propósitos.

La terminología empleada para designar esta propiedad ha sido objeto de un tratamiento muy amplio por parte de los especialistas de la ciencia del suelo y la hidrología, llegándose definitivamente a la conclusión de denominar conductividad hidráulica a la propiedad física que se puede medir y expresar en términos de la K de Darcy, conocida como factor de proporcionalidad en la ecuación $V = Ki$ y que se define como la velocidad de filtración que se presenta en un medio poroso saturado cuando el gradiente de energía es igual a la unidad (Herrera, 1978). En la literatura especializada de los países socialistas el término usado es el de coeficiente de filtración. Otros autores hacen uso del término permeabilidad. En este trabajo se sigue el criterio de utilizar el nombre de conductividad hidráulica en correspondencia con la ley de Darcy, considerando que esta no tiene confusión con otras propiedades hidrofísicas del suelo.

El factor K tiene las mismas dimensiones que la velocidad o sea LT^{-1} y se expresa en diferentes unidades según el uso que se haga de

ella, aunque en los trabajos de drenaje e hidrología es más generalizado expresarla en metros por día (m/d).

La primera referencia a esta propiedad en los suelos de Cuba aparece reportada en 1928 por Bennett y Allison, (1962), sobre las determinaciones hechas por Terzaghi con muestras alteradas en permeámetro sin tenerse después más información al respecto, produciéndose a partir de 1978 con la importancia que adquieren los trabajos de drenaje y recuperación de los suelos afectados por excesos de humedad y/o por la salinidad un mayor interés por esta característica. Las primeras determinaciones de campo se hicieron aisladamente y sólo con fines de proyectar los sistemas de drenaje. Sin embargo, la importancia de la conductividad hidráulica de los suelos de Cuba rebasa este marco y se convierte en un factor de primer orden para caracterizar los suelos en relación con los problemas de drenaje, sus posibilidades de mejoramiento y sus relaciones hidrológicas con el medio geográfico.

Para determinar la conductividad hidráulica del suelo existen numerosos métodos. El uso de cada uno de ellos depende del objetivo del trabajo a realizar, la precisión requerida, el tipo de suelo y los medios materiales y tiempo de que se disponga (herrera, 1978). Entre ellos, los de uso más generalizado por su posibilidad de utilización en diferentes tipos de suelo, su confiabilidad y operatividad se encuentra el de hoyo de barrera (Auger hole o método de Hooghoudt) para suelos con un nivel freático cerca de la superficie y el inverso del hoyo de barrera (Método de Porchet) para suelos con un nivel freático profundo (Kessler y Oosterbaan, 1977). Dentro de los métodos de laboratorio el uso del permeámetro es el más generalizado, aunque a este se le atribuye una baja precisión dado que requiere de un tamaño de muestra grande ($n > 30$) para lograr un valor representativo del suelo (Herrera, 1978).

Para realizar el estudio de la conductividad hidráulica de los principales suelos agrícolas de Cuba se seleccionaron aquellos más representativos por su extensión, uso en la agricultura, características físicas, características naturales de drenaje y nivel de información bibliográfica con relación a su clasificación. Se escogieron áreas específicas para realizar las pruebas, tomando como base los mapas de suelos de las clasificaciones genética y morfológica de los

suelos de Cuba y diversos planos de estudios detallados al nivel de empresas agrícolas en el país, comprobando la clasificación del suelo con las características de los perfiles a través de las barrenaciones para cada prueba.

Se tomaron como métodos para hacer las determinaciones el de hoyo de barrena y el inverso de hoyo de barrena en los trabajos de campo y se realizó un estudio comparativo con tres tipos de suelos usando el permeámetro para establecer las posibilidades del uso del método en la caracterización de esta propiedad.

En los dos métodos de campo los instrumentos utilizados son una barrera de 8 cm de diámetro y 2 metros de longitud para barrenar el suelo hasta la profundidad deseada, una cinta métrica metálica, flotador y soporte estandarizado para hacer las lecturas de ascenso o descenso del agua en el interior del barreno, una bomba manual de achique para hacer descender el nivel freático y un tubo-filtro de 8 cm de diámetro para utilizar en terrenos con estructura inestable como protector del hoyo. Todos estos instrumentos constituyen un equipo de procedencia Holandesa de la marca EIJKELKAMP que pertenece al laboratorio de Suelos y Agua del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje del Ministerio de la Agricultura.

Van Burs (1958); citado por Dieleman y Trafford (1976), ha establecido el método y la forma de cálculo de la conductividad hidráulica de forma práctica. El procedimiento consiste en barrenar un hoyo de 6,8 o 10 cm de diámetro con una barrena hasta una profundidad por debajo del nivel freático, bombear dos o tres veces con la bomba manual para limpiar al hoyo y recuperar la porosidad en el barreno, finalmente achicar el nivel de agua de nuevo y medir la velocidad de ascenso de ésta en el interior del hoyo hasta que éste se haya llenado alrededor de un cuarto de la profundidad medida a partir del nivel freático, la conductividad hidráulica es calculada utilizando una de las fórmulas de Ernest (1950), o por un método gráfico desarrollado por Ernest (1950) y modificado por Van Beers (1976). La figura 1 muestra en forma general como se realiza la determinación.

En caso de no encontrarse el nivel freático próximo a la superficie del suelo se utiliza el método inverso del hoyo de barrena, también

conocido como el método de Porchet (Kessler y Oosterban, 1977). El procedimiento es prácticamente el mismo variando solamente en el hecho de que el barreno se llena de agua y se mide la velocidad de descenso. Los cálculos se pueden realizar por fórmulas específicas o gráficamente como se muestra en la Figura 2.

Utilizando el permeámetro la "K" puede ser determinada de dos formas: con carga hidráulica constante (para suelos permeables) y con carga hidráulica variable (para suelos de baja permeabilidad), las muestras de suelos se extraen por barrenación en cilindros de 100 cm³ de volumen, después se saturan por un tiempo mayor de 24 horas y se colocan en el equipo para hacer las determinaciones de gasto, carga y tiempo. En la figura 3 se muestra un resumen de este método.

Los valores obtenidos en las pruebas de conductividad hidráulica varían considerablemente, aún en aquellas realizadas en el mismo sitio Dieleman y Trafford (1976), reportan variaciones entre 1 y 10 veces para un mismo suelo. Herrera (1978), señala que la mayor fuente de inseguridad para medir la K es la gran variabilidad que tiene el suelo. Esto conlleva a tener que establecer el número de pruebas que se deben hacer área para no perder precisión y el método que se debe seguir para recoger un valor único que sea representativo de las condiciones medias del suelo. Van Beers, (1976); sugiere realizar 1 prueba cada 0,8 ha para trabajos de investigaciones y diseño de los sistemas de drenaje. El Comité de Consultores de Estudios de Factores para el Diseño de los Sistemas de Drenaje (FAO, 1980), recomienda para suelos heterogéneos realizar una prueba cada 5 a 10 ha y para suelos homogéneos una prueba cada 25 a 50 ha, todo esto relacionado con los métodos de campo. Para el caso del permémetro la situación es similar pero aquí la variabilidad aumenta encontrándose casos de diferencias de valores de hasta más de 100 veces.

La conductividad hidráulica se estudió en once tipos genéticos de suelo según la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, (1979) a través de pruebas de campo y con el método del permémetro se estudiaron cinco subtipos (Ferríticos, Ferralítico Rojo Compactado, Ferralítico Rojo (Navajas), Pardo con Carbonatos y Oscuro Plástico Gleyzoso).

Para la obtención del valor representativo de la conductividad hidráulica de cada suelo se hizo la distribución logarítmica normal de los valores obtenidos escogéndose como valor único el de 50% de probabilidad, valor que representa la media logarítmica.

En la Tabla 1, aparecen los intervalos de valores de la conductividad hidráulica de cada subtipo de suelo para una profundidad media de un metro, representado cada extremo por una media logarítmica para un conjunto de valores inferiores y superiores de cada grupo de pruebas de una misma categoría genética.

Tablas 1

Rangos de valores de la conductividad hidráulica ($K = m/d$) para diferentes tipos de suelos cubanos. (Profundidad media de un metro).

N_1	Tipo de suelo	Conductividad Hidráulica (m/d)	Profundidad del nivel Freático (m)
1	Ferralítico Rojo Típico	30-50	5
2	Ferralítico Rojo Compactado	14-20	5
3	Ferralítico Rojo Hidratado	0,80 - 3,50	5
4	Ferralítico Cuarzítico Amari- llo Rojizo Lixiviado.	0,25 - 2,80	2
5	Ferralítico Cuarzítico Amari- llo Lixiviado.	0,85 - 5,00	2
6	Fersialítico Pardo Rojizo	0,50 - 0,80	2-3
7	Pardos con carbonatos	0,10 - 0,35	3
8	Pardos sin carbonatos	0,001 - 0,035	2
9	Oscuro Plástico Gleyzoso	0,001 - 0,003	2
10	Aluvial Diferenciado	0,80 - 1,30	2
11	Solonchak (Guantánamo)	0,30 - 0,75	2

Como puede apreciarse por la magnitud del valor de la conductividad de los suelos, existe una relación bien marcada entre el grado de desarrollo del suelo y sus condiciones de transmisión de agua en estado saturado. Los suelos Ferralíticos son los que presentan un valor más alto lo cual está en correspondencia con sus características,

texturales e hidrofísicas en general (porosidad, velocidad de infiltración, etc) así mismo, dentro de éstos existe una tendencia a disminuir la transmisión a partir de la ocurrencia de horizontes compactados (Suelos Ferralíticos Rojo Compactado), el contenido de arcilla (Ferralítico Rojo Hidratado) y el tipo de material de base (Ferralítico Cuarcítico Amarillo Rojizo Lixiviado y Ferralítico Cuarcítico Amarillo Lixiviado) lo que se manifiesta en las condiciones de drenaje de cada uno dadas por la presencia de niveles freáticos suspendidos, encharcamientos temporales y formaciones de cursos de evacuaciones superficiales. En el caso del suelo Ferralítico Rojo Típico vemos que su alta conductividad está en correspondencia con las características hidrológicas de su sustrato (caliza cavernosa del Mioceno) para el cual Pérez Franco (1969), reporta valores de K mayores de 100 m/d.

Los tipos Ferralítico Pardo Rojizo, Aluvial Diferenciado y Solonchak (Guantánamo) tienen condiciones medias de transmisión del agua en estado según las tablas de clasificación de autores como O'Neal y Umland descrita por Herrera (1978), Pizarro, (1978) y Van Beers, (1976).

Siguiendo estos mismos criterios los suelos Pardo con Carbonatos son de permeabilidad lenta o baja, en los Pardos sin Carbonatos hallamos fuertes características de impermeabilidad al registrarse valores muy próximos a los suelos Oscuro Plástico Gleyzoso que mostraron los valores más bajos y en muchos casos sin transmisión de agua por lo que se clasifican como impermeables prácticamente (Pizarro, 1978).

En los resultados obtenidos con el permémetro se puede apreciar que las diferencias son considerables entre este método y los de campo. Como se muestra en la Tabla 2 los valores de la conductividad hidráulica registrada para cada tipo de suelo para diferentes tamaños de muestra en el permémetro difieren considerablemente de aquellos hallados por los métodos de campo aún en el caso del suelo Ferralítico Rojo Compactado para el cual se probó hasta un tamaño de muestra de 100; observándose que sólo los datos se aproximan al rango más bajo hallado en las pruebas directamente en el suelo.

Tabla 2

Conductividad Hidráulica ($K = m/d$) para tres tipos de suelos usando el permeámetro y los métodos de campo (Método de Hoog-houdt y de Porchet) (Profundidad 1 m).

Tipos de suelos	Método de permeámetro tamaño de muestra (N)					Método de Campo para n=10
	10	25	50	75	100	
Ferralítico Rojo Compactado	16	13	12	13	15	14-30
Pardo con Carbonato	0,05	0,01	-	-	-	0,10-0,35
Oscuro Plástico Gleyzoso	0,01	0,000	-	-	-	0,001 - 0,003

De los suelos Ferralítico Rojo (Navajas) y Ferrítico se obtuvieron datos con el permeámetro para observar los resultados de esta técnica en suelos de alta permeabilidad. En la tabla 3 aparecen reflejados los valores obtenidos. En el caso del suelo Ferralítico Rojo (Navajas) se obtuvo un rango entre 10 y 20 m/día que es inferior para el hallado para el Ferralítico Rojo Típico en las pruebas de campo.

Tabla 3

Conductividad Hidráulica ($K=m/d$) para dos tipos de suelos de Alta Permeabilidad ($K=6 m/d$). Obtenida con permeámetro de carga constante.

Tipo de suelo	Conductividad hidráulica ($K=m/d$) para tamaños de muestra:			
	n=5	n=10	n=15	n=20
Ferralítico Rojo (Navajas)	20	13	13	10
Ferrítico	114	120	80	50

Para el tipo Ferrítico los valores son muy diferentes, debido a las condiciones físicas de estos suelos y sus condiciones naturales de excelente drenaje son considerados como los de mayor permeabilidad en el país (Bennett y Allison, 1962) se reporte su conductividad hidráulica como mayor de 50 m/día.

Tomando en consideración que el criterio de clasificación empleado con mayor frecuencia es el de O'Neal y Uhland (Herrera 1978) y que la clasificación holandesa (Kessler y Oosterban, 1976 y Van Beers, 1976), también refleja las condiciones medias de drenaje de los suelos según los valores de la conductividad hidráulica se realizó la agrupación de los tipos de suelos estudiados en siete categorías de drenaje considerando los resultados obtenidos en los suelos cubanos, y sus características de drenaje natural como la existencia de niveles freáticos próximos a la superficie, encharcamientos temporales o permanentes y red de evacuación superficial en correspondencia con las clases de estas dos primeras clasificaciones. Así podemos en forma preliminar categorizar como se muestra en la Tabla # 4 a los diferentes tipos de suelos de los que se tienen datos cuantitativos de conductividad hidráulica.

(Ver Tabla 4)

Se estudió la conductividad hidráulica de trece subtipos genéticos de suelos cubanos, en once se halló esta propiedad utilizando los métodos de campo de mayor uso y precisión; el método de hoyo de barrera o de Hooghoudt para suelos con nivel freático próximo a la superficie del suelo y el método inverso de Porchet para suelos con niveles freáticos profundos y para otros dos tipos genéticos de alta permeabilidad se utilizó un permeámetro de carga constante.

Los valores de conductividad hidráulica hallados fueron expresados en m/día por ser las unidades de mayor uso en las especialidades de drenaje e hidrología, estos valores son muy variables en cada tipo genético de suelo por lo que los valores fueron expresados en intervalos correspondiendo sus extremos a los valores del 50% de probabilidad en cada conjunto de datos.

Se compararon los valores obtenidos con las pruebas de campo y con el permeámetro en los suelos del tipo Ferralítico Rojo Compactado, Pardo con Carbonato y Oscuro Plástico Gleyzoso, encontrándose que las diferencias son notables por lo que se desestiman los valores hallados con el permeámetro para caracterizar la conductividad hidráulica de los suelos de Cuba.

Siguiendo los criterios de las clasificaciones norteamericana y holandesa para los valores de la conductividad hidráulica de los suelos se establecieron siete categorías de drenaje para los suelos cubanos estudiados que reflejan las condiciones medias del drenaje interno de estos.

Tabla 4

Categorías de drenaje de algunos de los principales Suelos Agrícolas Cubanos, según sus valores de conductividad hidráulica ($K=m/dia$) en correspondencia con las clasificaciones Norteamericana y Holandesa

Oläse	Tipos de Suelo	K (m/d)	Categoría de drenaje
Extremadamente rápida	Ferrítico, Ferralítico Rojo típico, Ferralítico Rojo Compacto.	6	I Excelente, Altamente permeable
Muy rápida	Ferralítico Cuarcítico Amarillo Li xiviado.	3-6	II Muy buena a excelente Muy permeable.
Rápida	Ferralítico Cuarcítico Amarillo Ro jizo Lixiviado. Ferralítico Cuarcítico Amarillo Li xiviado. Ferralítico Rojo Hidratado.	1,5-2,9	III Muy Buen a Buena. Permeable.
Moderada	Ferralítico Cuarcítico Amarillo Ro jizo Lixiviado. Ferralítico Cuarcítico Amarillo Li xiviado. Ferralítico Rojo Hidratado. Ferralítico Pardo Rojizo. Aluvial Diferenciado Solonchack.	0,5-1,49	IV Buena, Permeable, a regularmente permeable.
Lenta	Ferralítico Cuarcítico Amarillo Ro jizo Lixiviado.	0,1-0,49	V Regular. Baja permeabilidad.
Muy lenta	Pardo sin Carbonatos	0,03-0,09	IV Mala, Muy baja permeabilidad.
Extremadamente Lenta	Oscuro Plástico Gleyzoso	0,029	VII Muy mala. De muy baja permeabilidad a prácticamente impermeable.

BIBLIOGRAFÍA

- BENNETT, H. H. y ALLISON, R. V. (1962): Los suelos de Cuba. Publicación Nacional UNESCO. La Habana.
- DIBLEMAN, P. J. and TRAFFORD B. D. (1976): Drainage testing-Irrigation and grainage paper, No. 28, FAO. Roma.
- FAO (1980): Drainage factors. Expert consultation on drainage factors. Irrigation and drainage paper No. 28 FAO. Roma
- HERRERA NUÑEZ, M.T. (1978): Método para estimar la conductividad hidráulica "K". Memorandum técnico No.373. Secretaría de Agricultura y Recursos hidráulicos. México.
- INSTITUTO DE SUELOS (1980): Clasificación genética de los suelos de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana.
- KESSLER, J. y Oosterban R. J. (1977): Determinación de la conductividad hidráulica de los suelos. Principios y aplicaciones del drenaje. Tomo III. Estudios e investigaciones. International Institute for Land Reclamation and Improvement. The Netherlands.
- PÉREZ, FRANCO D. (1969): Análisis del flujo hacia un pozo en régimen permanente y su aplicación a los acuíferos cubanos. Tecnología. Serie 10. Ingeniería Hidráulica. No. 2. Julio, 1969. Universidad de la Habana, Habana. Cuba.
- PIZARRO, FERNANDO (1978): Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora agrícola Española. S.A. Madrid, España.
- VAN, BEERS, W. F. J., (1976): The auger hole method. International Institute for Land. Reclamation and Improvement Wageningen. The Netherlands.

FIGURAS

FIGURES

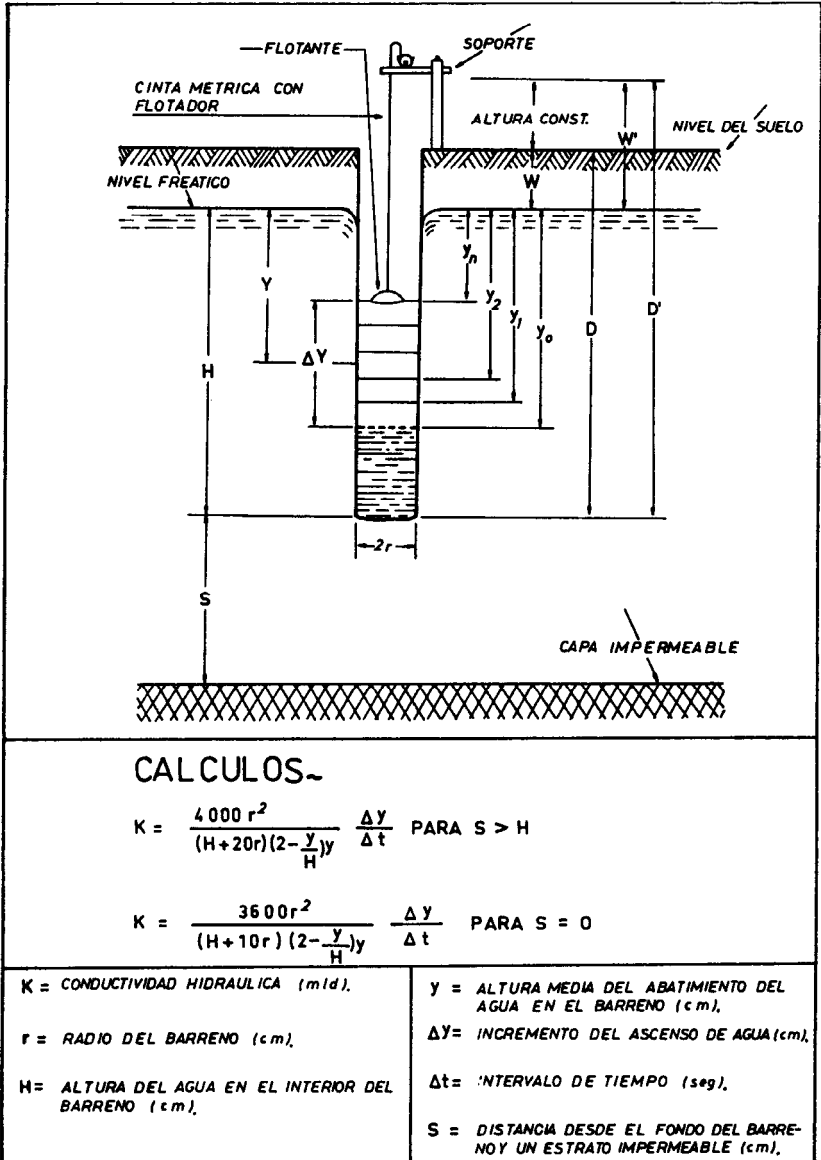


Fig. 1 : Esquema del método de hoyo de barrena o de Hooghoudt y cálculo de la conductividad hidráulica

Fig. 1 : Schéma de la méthode de la tarière ou de Hooghoudt et calcul de la conductivité hydraulique

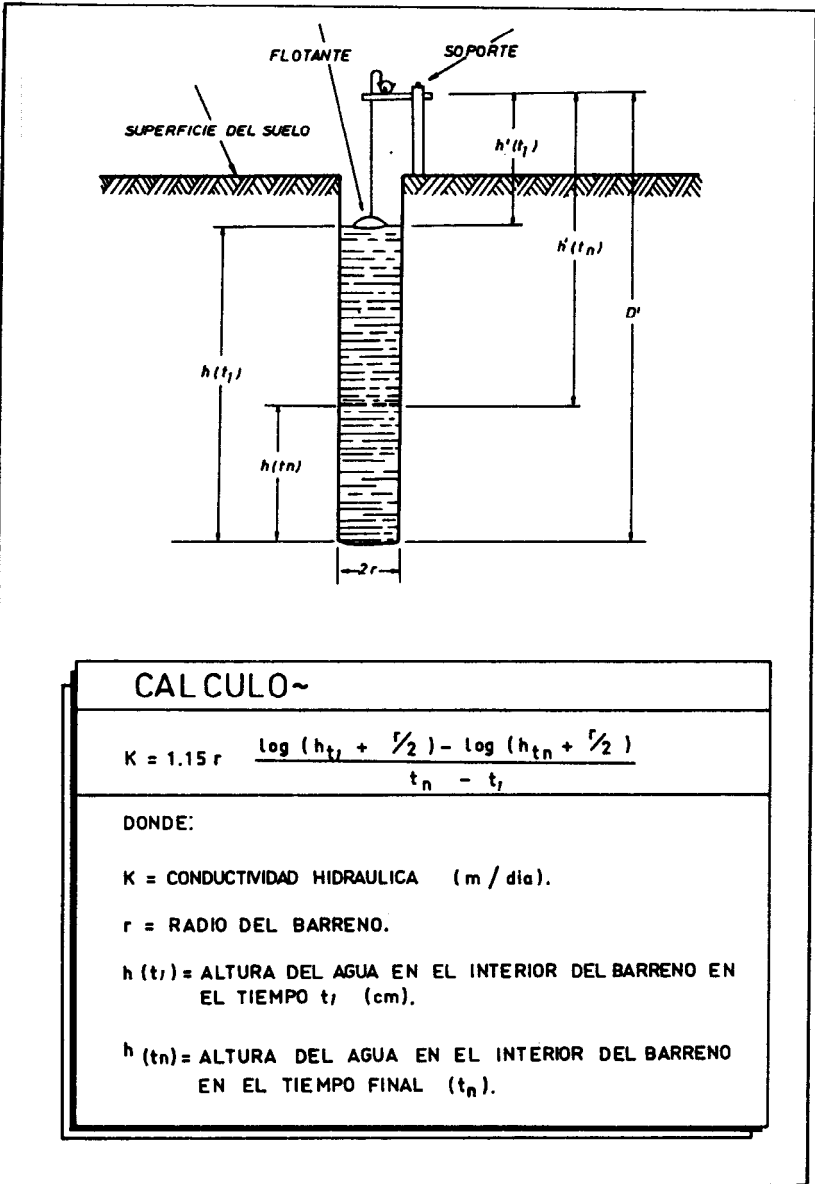


Fig. 2 : Esquema del método de Porchet y cálculo de la conductividad hidráulica

Fig. 2 : Schéma de la méthode de Porchet et calcul de la conductivité hydraulique

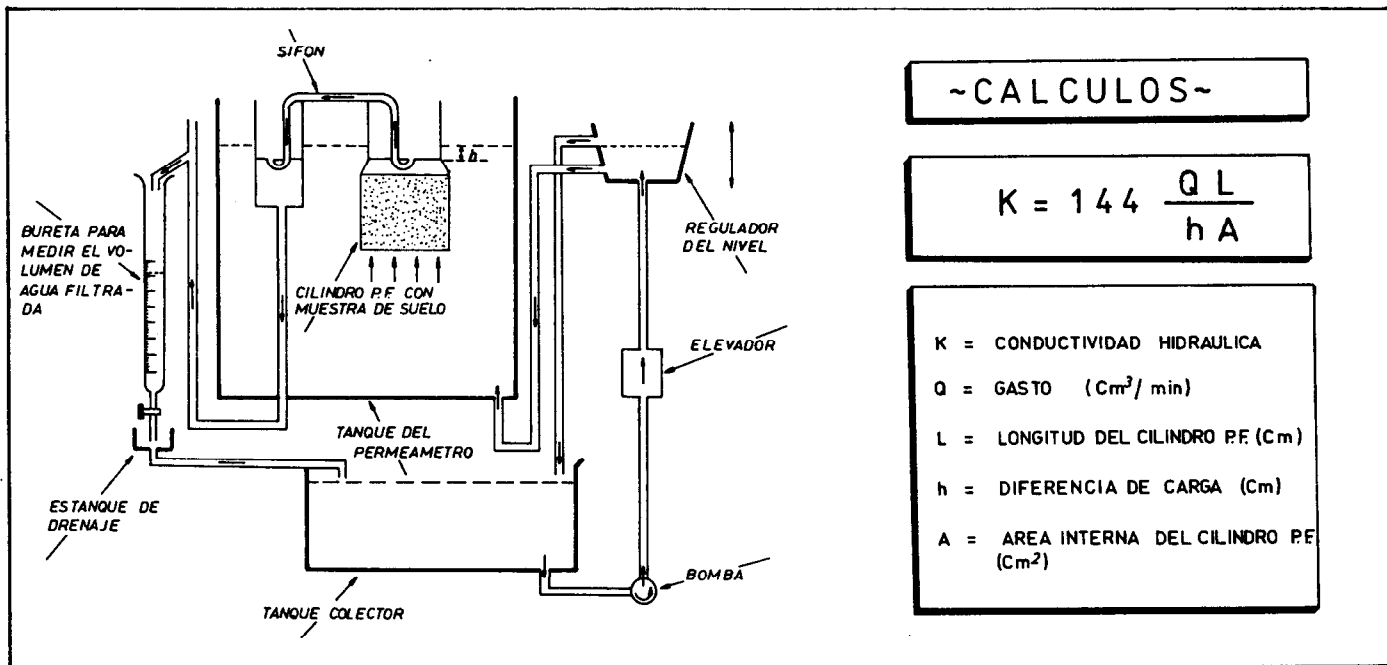


Fig. 3 : Esquema del permeámetro de laboratorio y cálculo de la conductividad hidráulica con carga constante

Fig. 3 : Schéma du perméamètre de laboratoire et calcul de la conductivité hydraulique à charge constante