



Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias

ISSN: 1010-2760

paneque@isch.edu.cu

Universidad Agraria de La Habana Fructuoso

Rodríguez Pérez

Cuba

Medina González, Hanoi; García Coronado, Jorge; Núñez Acosta, Daniel  
El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del  
tamaño de partículas de suelo

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 16, núm. 3, 2007, pp. 19-24

Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez  
La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93216305>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo

## The hydrometer method: theoretical basis for its employment in determining the soil particle-size distribution

Hanoi Medina González<sup>1</sup>, Jorge García Coronado<sup>2</sup> y Daniel Núñez Acosta<sup>2</sup>

**RESUMEN.** El objetivo de este trabajo es explicar físicamente las bases en las que se sustenta el método del hidrómetro de la distribución del tamaño de partículas de suelos. Se describen detalladamente las ecuaciones relacionadas con el principio físico de fenómeno y del principio de funcionamiento del hidrómetro como tal. Se realiza un análisis de la relación que existe entre estas ecuaciones y las simplificaciones más reconocidas del método.

**Palabras clave:** hidrómetro, Bouyoucos, partícula, textura, suelo.

**ABSTRACT.** The objective of this work is to physically explain the bases supporting the hydrometer method for determining the soil size particle distribution. The equations related to the physical principles of the phenomenon and the principle of working of the hydrometer as such, are explained in details. An analysis of the relationship between these equations and the most well recognized simplifications of the method is carried out.

**Key words:** hydrometer, Bouyoucos, particle, texture, soil.


### INTRODUCCIÓN

La determinación de la distribución del tamaño de partículas (ATP) es uno de los más comunes e importantes análisis dentro del campo de la física de suelos; es usado en análisis texturales para la clasificación de suelos con propósitos agronómicos e ingenieriles. Tiene también una relación directa e indirecta con la distribución poral de suelos y, por tanto, con las propiedades de retención de humedad.

Existe una amplia gama de métodos que permiten llevar a cabo este tipo de análisis, los cuales se identifican, generalmente, por el medio. Entre ellos tenemos: hidrómetro, pipeta, sensor de presión, rayos x, y el de difracción de rayos láser (GEE y OR, 2002). Se sabe, sin embargo, que los resultados del análisis dependen del método de determinación (GEE y BAUDER 1986; GEE y OR, 2002). De ahí la importancia de indicar claramente qué método y pretratamiento se ha empleado cuando se reporta la distribución de valores.

**Recibido** 09/04/07, **aprobado** 04/06/07, **trabajo** 45/07, metodología de investigación.

<sup>1</sup> Dr., Lic., Profesor de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Apdo. 18, San José de las Lajas, La Habana 32700, Cuba.

E-: [hanoi@isch.edu.cu](mailto:hanoi@isch.edu.cu)

<sup>2</sup> Lic., Profesor de la UNAH.

En nuestro país el método que se emplea con mayor regularidad es el del hidrómetro. El mismo se sustenta en la ley de Stokes, que para el hidrómetro puede ser escrita como una dependencia lineal entre el diámetro de la partícula,  $X$ , y el inverso de la raíz cuadrada del tiempo del tipo:

$$X = \theta t^{-1/2} \quad (1)$$

donde  $\theta$  es un parámetro de sedimentación y es una función de la profundidad de asentamiento del hidrómetro, la viscosidad de la solución y la densidad de la partícula y la solución.

Dentro del propio método se reconocen dos aproximaciones principales: la seguida por la Sociedad Americana de Certificación de Materiales (ASTM, 2000), y la de la Sociedad Americana de las Ciencias del Suelo (SSSA) (GEE y OR, 2002). La SSSA basa su metodología en una versión modificada de la de DAY (1965) y la de la ASTM (1985). Según BOHN y GEBHARDT (1989), hay tres elementos indispensables para la seguridad del método, son ellos: el control de la temperatura, el dispersante y el tiempo de medición de la densidad.

El procedimiento seguido en nuestro país en relación con el tipo y concentración del dispersante y el tiempo de mojado y posterior agitación del suelo en la solución, se corresponde bastante con lo observado en la literatura. No obstante se aplica una versión bastante simplificada del método de la ASTM en cuanto a los tiempos de medición, lo que limita las potencialidades del mismo. Por otro lado se ha corroborado que en ocasiones no se manejan a fondo las bases teóricas de la misma y eso ha dado lugar a errores sistemáticos en los valores reportados.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis físico detallado de los fundamentos de la técnica, donde se demuestran los principios que rigen el método del hidrómetro.

## PRINCIPIO GENERAL DEL MÉTODO

Sobre una partícula de suelo en una solución líquida actúan dos fuerzas fundamentales. Una de las fuerzas,  $F_{ab}$ , dirigida hacia abajo, está dada por la diferencia entre el peso de la partícula de suelo y el líquido desplazado:

$$F_{ab} = g(m_s - m_l) \quad (2)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $m_s$  y  $m_l$  son las masas de la partícula de suelo y del líquido desplazado, respectivamente. Considerando que la partícula tiene forma perfectamente esférica, la ecuación anterior puede ser escrita como:

$$F_{ab} = \frac{1}{6} \pi g X^3 (\rho_s - \rho_l) \quad (3)$$

donde  $\rho_s$  y  $\rho_l$  son las densidades de suelo y del líquido respectivamente.

La otra fuerza que actúa sobre la partícula es la fuerza de Stokes,  $F_{ar}$ , y está dirigida hacia arriba:

$$F_{ar} = 3\pi X \eta v \quad (4)$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del líquido y  $v$  es la velocidad de caída de la partícula. A medida que se incrementa la velocidad de la partícula, como consecuencia de la fuerza constante  $F_{ab}$ , se incrementa  $F_{ar}$ . Cuando esta se iguala a  $F_{ab}$ , la partícula desciende con velocidad constante.

Igualando ambas expresiones, se obtiene que la velocidad final de la partícula está dada por:

$$v = g(\rho_s - \rho_l) X^2 / 18\eta \quad (5)$$

Cuando se utiliza esta ecuación se asumen cuatro principios fundamentales, ellos son: (1) la velocidad  $v$  se alcanza tan pronto como comienza la decantación del suelo, (2) la decantación y la resistencia son enteramente debido a la viscosidad del fluido, (3) las partículas son lisas y esféricas y (4) no existe interacción entre partículas individuales. GIBBS *et al.* (1971) demostraron que las dos primeras consideraciones se cumplen para partículas menores de 80  $\mu\text{m}$  de diámetro. Como las partículas no son lisas y esféricas,  $X$  debe ser asumida como un diámetro equivalente.

En análisis mineralógicos existe la necesidad de separar varios tipos de fracciones de suelo mediante la decantación de las partículas que permanecen sobre un plano  $z = -h$  en una solución homogénea, en un tiempo  $t$  igual a:

$$t = 18\eta h / g (\rho_s - \rho_l) X^2 \quad (6)$$

Reagrupando los términos se obtiene que:

$$X = [18\eta h / g (\rho_s - \rho_l)]^{1/2} t^{-1/2} \quad (7)$$

De aquí que  $\theta$  en la Ec. 1 pueda ser escrita como:

$$\theta = [18\eta h' / g (\rho_s - \rho_l)]^{1/2} \quad (8)$$

donde ahora  $h'$  es igual a la profundidad de asentamiento del hidrómetro particular que se emplea, en cm. Su valor es una medida de la profundidad efectiva del asentamiento para partículas con diámetro  $X$  y se relaciona con la lectura del hidrómetro,  $R$ , dependiendo del diseño específico y la forma del hidrómetro (ASTM, 1985). Esta relación puede ser aproximada según la expresión (GEE y OR, 2002):

$$h' = L_1 + 1/2 (L_2 - V_B / A) \quad (9)$$

donde  $L_1$  (cm), es la distancia a lo largo del tallo del hidrómetro, desde la parte superior del bulbo hasta la marca correspondiente a la lectura del hidrómetro;  $L_2$  (cm), es el largo del bulbo del hidrómetro;  $V_B$  (cm<sup>3</sup>), es el volumen del bulbo y  $A$ , es el área de la sección transversal del cilindro de sedimentación.

El valor de  $h'$  puede ser aproximado a su vez por la siguiente relación:

$$h' = -0.164R + 16.3 \quad (10)$$

Ello es el resultado de considerar un hidrómetro ASTM 52H y un cilindro de sedimentación estándar:  $L_1 = 10.5$  cm para una lectura,  $R$ , de 0 g L<sup>-1</sup>, y 2.3 cm para una lectura

$R$  de  $50 \text{ g L}^{-1}$ ;  $L_2 = 14,0 \text{ cm}$ ,  $V_b = 67,0 \text{ cm}^3$ ; y  $A = 27,8 \text{ cm}^2$ . Cualquiera que sea la forma en que se aplica el método, el objetivo es obtener una relación entre el por ciento de partículas en suspensión y su diámetro.

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL HIDRÓMETRO DE SUELOS

El hidrómetro, cualquiera que sea su tipo, es un dispositivo que permite medir la densidad de la solución en la cual se suspende. En el caso del hidrómetro de suelos la densidad total de la solución compuesta por agua, suelo y dispersante se calcula como:

$$\rho_{total} = \frac{m_{total}}{V_{total}} = \frac{m_{H_2O} + m_s + m_{dis}}{V_{total}} \quad (11)$$

donde  $V_{total}$  y  $m_{total}$  son el volumen y la masa de la solución, respectivamente, calculada esta última como la suma de la masa de agua ( $m_{H_2O}$ ), la masa de suelo seco ( $m_s$ ) y la masa de dispersante ( $m_{dis}$ );  $\rho_{total}$  es la densidad que leería un hidrómetro convencional de gravedad específica, es decir es la densidad real de la solución.

Expresando  $m_{H_2O}$  en función de la densidad del agua  $\rho_{H_2O}$ , las masas y las densidades del líquido y el dispersante  $\rho_s$  y  $\rho_{dis}$ , respectivamente, se arriba a:

$$\rho_{total} = \rho_{H_2O} + \frac{m_s}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_s} \right) + \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{dis}} \right) \quad (12)$$

Con un hidrómetro de suelo se busca medir la cantidad de partículas de suelo en volumen dado de solución. Según la ecuación 12, ello se obtiene mediante la expresión:

$$\frac{m_s}{V_{total}} = \frac{\rho_{total} - \rho_{H_2O} - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{dis}} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_s} \right)} \quad (13)$$

Aunque esta es la magnitud a medir, su valor no se corresponde necesariamente con la lectura del hidrómetro, debido a que este pudo haber sido calibrado con condiciones diferentes en cuanto a temperatura, densidad de la solución y densidad específica de suelos.

La Figura 1 muestra de manera esquemática cómo quedaría la escala de densidad de suelos para un mismo hidrómetro, calibrado en una misma solución y con un mismo suelo, pero a dos temperaturas distintas. Para la temperatura menor, el valor de máxima densidad de suelos está desplazado hacia abajo y las líneas de división son más estrechas. Ese comportamiento se explica por la dependencia entre la densidad del agua y la temperatura (ecuación 13).

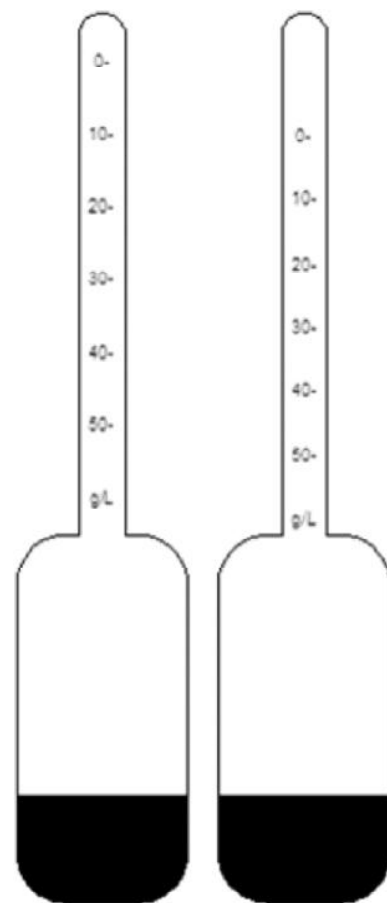


FIGURA 1. Representación esquemática de dos hidrómetros calibrados a temperatura  $T_1$  (izquierda)  $>$   $T_2$ .

El valor de la densidad de suelo en la solución es igual a la lectura del hidrómetro,  $R$ , solo cuando esta se efectúa en condiciones similares a las que fue calibrado el dispositivo. De ahí que la lectura que se obtiene debe ser generalmente corregida. Suponiendo que se realiza una lectura con el hidrómetro en un litro de solución  $T_1 = 20^\circ \text{C}$ , y asumiendo que esa es la temperatura real de calibración del hidrómetro, se tiene:

$$\frac{m_s}{V_{total}} = R = \frac{\rho_{total} - \rho_{H_2O}^1 - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_{dis}} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_s} \right)} \quad (14)$$

donde el prefijo 1 indica que los valores de las magnitudes se consideran a esa temperatura. Dado que el hidrómetro se calibró a esa temperatura, la lectura del mismo coincide con la densidad real de suelo en la solución. Si se toma una medición en la solución blanco a esa temperatura se tiene:

$$\rho_{total}^1 - \rho_{H_2O}^1 - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_{dis}} \right) = 0 \quad (15)$$

ya que la masa de suelo sería igual a cero. Aquí  $\rho'_{total}$  es la densidad de la solución blanco a  $T_1$ .

Considérese ahora que se tiene el mismo volumen y se emplea el mismo hidrómetro, pero con el líquido a  $T_2 = 30^\circ \text{C}$ . Como la densidad del agua a  $T_2$  es menor, habrá menos masa total en un mismo volumen, el litro. Si se desea que el hidrómetro se suspenda a la misma profundidad que antes, habría que aumentar la cantidad de suelo, de modo que compense la diferencia de masa por concepto del incremento de la temperatura. En ese caso la  $\rho'_{total}$ , que es el término que determina el grado de suspensión, permanecería constante,

Del mismo modo, para la solución blanco a esa temperatura  $T_2$  se tendría que:

$$\rho''_{total} - \rho_{H_2O}^2 - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_{dis}} \right) = 0 \quad (17)$$

donde  $\rho''_{total}$  es la densidad total de la solución blanco a  $T_2$ .

Despejando la  $r_{total}$  en la ec. 14 y sustituyendo el resultado en la ec. 16, queda:

$$\frac{m_s}{V_{total}} = \frac{R \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_s} \right) + \rho_{H_2O}^1 + \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_{dis}} \right) - \rho_{H_2O}^2 - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_{dis}} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_{dis}} \right)} \quad (18)$$

Sustituyendo ahora la ec. 15 y la ec. 17 en la ecuación 18 queda:

$$\frac{m_s}{V_{total}} = \frac{R \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_s} \right) + \rho' - \rho''}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_s} \right)} \quad (19)$$

Esta ecuación es aproximada a:

$$\frac{m_s}{V_{total}} \approx R + \frac{\rho' - \rho''}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_s} \right)} \quad (20)$$

Es decir, la densidad que se desea medir depende de las densidades de la solución sin suelo a ambas temperaturas, la de calibración y la de medición, la densidad del agua a la temperatura de calibración y la densidad específica de suelos. Si se despeja  $R$  en la ec. 19 se tiene:

$$R = \frac{\frac{m_s}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_s} \right) + \rho' - \rho''}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_s} \right)} \quad (21)$$

es decir, el hidrómetro calibrado a  $20^\circ \text{C}$  haría la misma lectura, pero habría una densidad de suelo mayor dada por:

$$\frac{m_s}{V_{total}} = \frac{\rho_{total} - \rho_{H_2O}^2 - \frac{m_{dis}}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_{dis}} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_s} \right)} \quad (16)$$

donde el prefijo 1 indica las magnitudes se consideran a la temperatura  $T_2$ .

Consecuentemente, la lectura del hidrómetro,  $R'$ , para la solución blanco a  $T_2$ , sería

$$R' = \frac{\rho' - \rho''}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_s} \right)} \quad (22)$$

Obsérvese que, aun cuando la lectura se hace en estas condiciones, el valor sí depende de la densidad del suelo, es decir de la densidad con que se calibró el hidrómetro.

Sustituyendo la ec. 22 en la ec. 21 se obtiene:

$$R - R' = \frac{\frac{m_s}{V_{total}} \left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^1}{\rho_s} \right)}{\left( 1 - \frac{\rho_{H_2O}^2}{\rho_s} \right)} \quad (23)$$

A partir de esto se llega, con buen grado de aproximación, a que:

$$\frac{m_s}{V_{total}} \approx R - R' \quad (24)$$

Esta no es más que una nueva forma de escribir la ec. 21, por lo tanto se puede obtener un valor de la densidad real de suelos usando la lectura corriente y una lectura paralela en una solución blanco. En los próximos epígrafes se fundamenta la relación entre estas ecuaciones y las metodologías más reconocidas en la actualidad para la puesta en práctica del método.

## METODOLOGÍA DE LA ASTM

En el caso del ASTM el por ciento de suelo en suspensión,  $P$ , se calcula según:

$$P = \frac{R_{ASTM} a}{m_s} \cdot 100 \quad (25)$$

donde  $R_{ASTM}$  es una lectura corregida que tiene en cuenta precisamente la diferencia de densidad de la solución producto de la diferencia de temperaturas, y  $a$  es un factor de corrección adimensional que tiene en cuenta las diferencias de densidad específica con respecto a la de calibración

El diámetro medio de las partículas,  $X$ , en mm, se obtiene a partir de la ec. 1, donde  $\theta$  se calcula como el producto de  $h'$ , usando la ec. 9, por una constante basada en la densidad de partículas de suelo y la temperatura de la suspensión. La ASTM provee una tabla de valores estandarizados de esa constante (ASTM, 2000).

Nótese que si la ec. 20 se transforma para calcular el por ciento de partículas de determinado diámetro (dividiendo por la masa de suelo seco y multiplicando por 100), no es más que una forma más general de expresar la ec. 25, correspondiente al método de la ASTM.

## MÉTODOLÓGIA DE LA SSSA

La principal diferencia de este método con respecto al anterior radica en que, en aquel caso se emplea un factor de corrección por temperatura, y en este, unido a la lectura convencional con el dispositivo, se realiza una lectura en la solución blanco. Esta lectura toma en cuenta los errores asociados a la fluctuación de temperatura en la solución, el incremento de la densidad de la solución producto del dispersante, y el error asociado al menisco del líquido a la hora de realizar la lectura.

En este método se calcula el por ciento de partículas en suspensión como:

$$P = \frac{R_{SSSA}}{m_s} \cdot 100 \quad (26)$$

donde  $R_{SSSA}$  es la lectura corregida del hidrómetro, calculada sustrayendo la lectura en la solución blanco a la lectura tomada con el suelo en suspensión.

El diámetro medio de partículas se obtiene de acuerdo con la ec. 7. Vea que esta ecuación tiene su origen en la ec. 26. Ello explica el que no se emplee un factor de corrección por densidad de suelo como en el caso de la ASTM. El error aso-

ciado a ese factor, está incorporado parcialmente en  $R'$ . Por ello, una y otra metodología son similares, solo cambia ligeramente el procedimiento.

## TIEMPOS DE LECTURA MÁS EMPLEADOS

El tiempo de lectura del hidrómetro depende del sistema de clasificación usado. La separación entre limo y arcilla, según la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelos (0,002 mm), por la que se rige Cuba, ocurre normalmente entre 8 y 12 horas de sedimentación, pero el tiempo exacto no puede ser identificado de antemano. Mediciones entre las 6 y las 8 horas y después entre las 12 y las 15 horas pueden dar una medida precisa de los por cientos de arcilla y limo.

Con el ánimo de reducir el tiempo de laboratorio, algunos investigadores han propuesto una variedad de tiempos de observación, los cuales permiten aproximarse al tamaño de partículas deseado a partir de un mecanismo de extrapolación. BOUYOUCOS (1962) sugirió que las lecturas a 40 segundos y 2 horas eran suficientes, pero GEE y BAUDER (1979) sostuvieron que 2 horas sobreestimaba la fracción arcilla y desarrollaron un método de medias ponderadas para el cálculo de la arcilla, llevando a cabo lecturas a 1,5 y 24 horas. PATRICK (1958) usó 35 segundos y 8 horas. La metodología promovida por la ASTM, y generalmente aceptada por las agencias de manejo de suelos, usa lecturas a 3, 10 y 30 minutos y 1,5; 4,5 y 12 horas (DAY 1965). Sin embargo, ASTM (1972) también recomendó 2; 5; 15 y 30 minutos y 1; 4 y 24 horas, y la 2da edición del Manual de Métodos Estándares (GEE y BAUDER, 1986) cita 30 y 60 segundos, 3; 10 y 30 minutos y 1; 1,5; 2 y 24 horas. Para salvar tiempo de laboratorio y hacer más expeditos los análisis, algunos laboratorios llevan a cabo una lectura entre 6 y 8 horas.

## FORMA EN QUE SE EMPLEA EL MÉTODO EN CUBA

En Cuba se emplea una versión bastante simplificada del método de ASTM. El por ciento de partículas se calcula como:

$$P = \frac{R_c}{m_s} \cdot 100 \quad (27)$$

es decir, sin tomar en cuenta la densidad de las partículas de suelo.  $R_c$  es un valor corregido de la lectura del hidrómetro que se obtiene a partir de la ecuación:

$$R_c = R + 0.36 (T_c - T_e) \quad (28)$$

donde  $T_c$  y  $T_e$  son la temperatura de calibración y de experimentación, respectivamente.

Si en la ec. 20 se sustituyen los términos relacionados con las densidades de la solución por una ecuación lineal en función de la temperatura, que en primera aproximación pudiera ser la función de dependencia del agua sin dispersante, y se asume una densidad de suelos de 2,65 g cm<sup>-3</sup>, se obtiene

una ecuación similar a la de corrección que se emplea en Cuba (ec. 28).

No obstante, la simplificación mayor radica en los tiempos de medición adoptados, 40 s, 4 min, 16 min y 1 h. En particular, la dificultad está dada con este último tiempo, ya que ello conlleva a asumir que, al cabo de la hora de iniciado el proceso de decantación, el contenido de partículas en suspensión, en el rango de medición del hidrómetro, está formado solo por arcilla.

## CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se hace una descripción física detallada del método del hidrómetro para el cálculo de la distribución del tamaño de partículas; se deducen las aproximaciones más extendidas del método (la de

ASTMA y la de SSSA), así como la versión empleada en Cuba. Se demuestra que ambas metodologías son muy similares entre sí; no obstante la simplificación adoptada en varios laboratorios de suelo en Cuba, a partir de la metodología de la ASTM, puede acarrear errores importantes al ser muy restrictiva en cuanto al tiempo de medición y la no consideración de la densidad específica de los suelos. La magnitud de estos errores es analizada en un próximo trabajo

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS), institución promotora del proyecto de investigación que ha posibilitado el desarrollo del presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: *Standard test method for particle-size analysis of soils*. D 422-63 (1972), 1985, Annual book of ASTM standards 04.08: 117-127, ASTM, Philadelphia, PA, 1985.
- \_\_\_\_\_: *Standard test method for particle-size analysis of soils*. D 422-63 (1998), 2000, Annual book of ASTM standards 04.08: 10-17, ASTM, Philadelphia, PA, 2000.
- BOUYOCOS, G.: «Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils», *Agron. J.*, vol. 54: 464-465, 1962.
- DAY, P.: *Particle fractionation and particle-size analysis*. In: Methods of Soil Analysis, Part 1, C.A. Black (ed), Number 9, Agronomy Series, Amer. Soc. of Agron., Inc., Madison, WI, 1965
- GEE, G.W. and J.W. BAUDER: «Particle size analysis by hydrometer: A simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters», *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, vol. 43: 1004-1007, 1979.
- \_\_\_\_\_: *Particle-size analysis*, In A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9, pp.383-423, ASA and SSSA, Madison, WI, 1986.
- GEE, G.W. and D. OR: *Particle-size analysis*, In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4, Book Series No. 5, SSSA, pp.255-293, Madison, WI.
- PATRICK, W.: «Modification of method of particle size analysis» *Soil Sci., Soc. Proc.*, 22: 366-367, 2002.
- GIBBS, R.J.; M.D. MATTHEWS and D.A. LINK: «The relationship between sphere size and settling velocity», *J. Sed. Petrol.*, vol. 41: 7-18, 1971.



Universidad Autónoma  
**CHAPINGO**

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN

# Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua



DEPARTAMENTO  
DE IRRIACIÓN



*Chapingo México, 2008*



DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA  
MECÁNICA AGRÍCOLA