

NUEVO METODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD APARENTE DE SOLIDOS POROSOS. APLICACION A MUESTRAS DE SUELO

GOSARLI¹, RR FILGUEIRA², DGIMENEZ³

¹Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Calles 60 y 119, CC 31, 1900 La Plata, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³Department of Environmental Sciences, Rutgers, The State University of New Jersey, 14 College Farm Road, New Brunswick, NJ 08901-8551, USA

Recibido 14 de noviembre de 2000, aceptado 4 de abril de 2001

A NEW METHOD FOR MESURING THE BULK DENSITY OF POROUS MATERIALS AND ITS APPLICATION TO SOIL SAMPLES

A non-destructive method to measure the bulk volume of porous materials is described. Archimedes' principle with two non-mixing liquids was used. A sample, suspended from a balance by a fine thread, is weighed successively in air, in liquid 1 and in liquid 2. Measurements were made on synthetic porous samples and on soil clods, in order to test the accuracy of the method and to compare it with the paraffin coating technique. In our case, the liquids were kerosene and a mixture of water and glycerin, but other liquids could be also used. The new method shows some advantages in comparison with the coating technique. The concept of bulk density is re-examined and the precision of its measurement discussed.

Key words: Bulk volume, Bulk density, Soil aggregates, Archimedes' principle.

INTRODUCCION

Entre los procedimientos empleados para medir el volumen aparente de agregados individuales relativamente grandes ($>1 \times 10^{-3}$ kg) están los que utilizan el empuje que reciben los mismos cuando, previamente recubiertos con alguna sustancia impermeable (cera, parafina, resina), se sumergen en un líquido de densidad conocida (McIntyre, Loveday 1974; Blake, Hartge 1986). Se trata de una técnica engorrosa y poco práctica. Un segundo grupo de métodos se basa en la saturación de la muestra con un líquido no polar de densidad conocida, queroseno, por ejemplo, y en la medida del volumen total de la muestra saturada por desplazamiento en el mismo líquido (McIntyre, Loveday 1974). El inconveniente de este procedimiento es que el agregado sale completamente embebido en el líquido utilizado y luego se lo somete a una succión para retirar el exceso de líquido de la superficie. Existe otra metodología (Chepil 1950), apropiada para la determinación del volumen aparente de agregados pequeños ($< 1 \times 10^{-3}$ kg), por comparación con partículas de arena del mismo rango de tamaño.

El volumen de un agregado estimado

por el método de la parafina (McIntyre, Loveday 1974) será diferente de aquel determinado usando resina o por imbibición en queroseno o cualquier otro líquido. El problema de definir cuál es el límite entre el exterior y el interior de un agregado no ha sido resuelto y las diferencias entre métodos pueden ser importantes cuando se trabaja experimentalmente, en especial para el caso de agregados pequeños. El objetivo del presente trabajo fue evaluar una metodología alternativa que puede evitar este inconveniente, mediante la determinación del volumen aparente de un material poroso y, consecuentemente, su densidad aparente, mediante el método del empuje (principio de Arquímedes) en dos líquidos no miscibles.

MATERIALES Y METODOS

Consideraciones teóricas

El fundamento del método aquí propuesto se basa en estudiar el balance de fuerzas que actúan sobre un objeto poroso sumergido, consecutivamente, en dos líquidos diferentes no miscibles. Del diagrama de fuerzas resultante, para el caso de una muestra seca sumergida en los líquidos, se obtiene:

$$F_1 = W_s + W_1 + W_A - E_{S1} - E_{11} - E_{A1} \quad (1)$$

$$F_2 = W_s + W_1 + W_A - E_{S2} - E_{12} - E_{A2} \quad (2)$$

donde F_1 es la fuerza ejercida por el hilo del que pende el objeto, sumergido en el líquido 1; F_2 idem, en el líquido 2; W_s es el peso del material sólido; W_1 es el peso del líquido 1 que penetró en los poros; W_A es el peso del aire (hipotético) atrapado; E_{s1} es el empuje del líquido 1 sobre el material sólido; E_{11} es el empuje del líquido 1 sobre el líquido 1 que se encuentra en los poros; E_{A1} es el empuje del líquido 1 sobre el aire (hipotético) atrapado; E_{s2} es el empuje del líquido 2 sobre el material sólido; E_{12} es el empuje del líquido 2 sobre el líquido 1 que se encuentra en los poros, y E_{A2} es el empuje del líquido 2 sobre el aire atrapado.

Restando la Ec. (2) de la Ec. (1) tendremos:

$$\delta F = F_1 - F_2 = W_s + W_1 + W_A - E_{s1} - E_{11} - E_{A1} - (W_s + W_1 + W_A - E_{s2} - E_{12} - E_{A2}) \quad (3)$$

Simplificando y reemplazando los empujes en función de las densidades y volúmenes respectivos, obtenemos:

$$\delta F = -\rho_1 g V_s - \rho_1 g V_1 - \rho_1 g V_A + \rho_2 g V_s + \rho_2 g V_1 + \rho_2 g V_A = g (\rho_2 - \rho_1) (V_s + V_1 + V_A) \quad (4)$$

donde ρ_1 es la densidad del líquido 1; ρ_2 es la densidad del líquido 2; V_s es el volumen del material sólido; V_1 es el volumen del líquido 1 que llena los poros; V_A es el volumen de aire (hipotético) atrapado. El volumen aparente será:

$$V_{ap} = (V_s + V_1 + V_A) = \frac{\delta F}{g (\rho_2 - \rho_1)} \quad (5)$$

Finalmente, la densidad aparente será:

$$\rho_{ap} = \frac{m_s g (\rho_2 - \rho_1)}{\delta F} \quad (6)$$

donde m_s es la masa seca del objeto poroso.

Estimación del error del método

El error involucrado en la medida del volumen aparente, utilizando diferenciales, sería, (Sadosky, Guber 1964):

$$dV_{ap} = \left\{ \frac{\partial V_{ap}}{\partial (\delta F)} \right\} d(\delta F) + \left\{ \frac{\partial V_{ap}}{\partial (\rho_2 - \rho_1)} \right\} d(\rho_2 - \rho_1) = \left[\frac{1}{(\rho_2 - \rho_1) g} \right] d(\delta F) + \left[\frac{\delta F}{(\rho_2 - \rho_1)^2 g} \right] d(\rho_2 - \rho_1) \quad (7)$$

El error correspondiente a la estimación de la densidad aparente sería:

$$d\rho_{ap} = \left[\frac{\partial \rho_{ap}}{\partial m_s} \right] dm_s + \left[\frac{\partial \rho_{ap}}{\partial V_{ap}} \right] dV_{ap} = \left[\frac{1}{V_{ap}} \right] dm_s + \left[\frac{m_s}{V_{ap}^2} \right] dV_{ap} \quad (8)$$

Procedimiento experimental

En un recipiente se colocan dos líquidos no miscibles, para formar un sistema de dos fases, que se ordenan según las densidades relativas. El procedimiento de medición propuesto implica suspender el objeto poroso de la parte inferior de una balanza electrónica (Figura 1), por medio de un hilo sintético fino y determinar el peso del mismo cuando

está en el aire, cuando está sumergido en el líquido 1 y cuando está sumergido en el líquido 2. Luego, con las Ecs. (5) y (6), se calculan V_{ap} y ρ_{ap} . En nuestro caso, se experimentaron varios líquidos, encontrándose que el queroseno, como líquido 1, y una mezcla de agua con glicerina al 50% en volumen, como líquido 2, fueron adecuados. Las densidades del queroseno y de la mezcla, a 25° C, medidos con la balanza de Mohr, fueron $\rho_1 = 0,81 \text{ Mg m}^{-3}$ and $\rho_2 = 1,14 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente. Es importante hacer notar que la técnica propuesta aquí es independiente de la proporción relativa entre los componentes del volumen aparente del material poroso (p.ej.: sólido, aire, agua). Las muestras secas fueron pesadas en aire y sumergidas inmediatamente en la fase superior (queroseno). Cerciorado el cese de la entrada de queroseno en los poros por la estabilidad de la lectura de la balanza, el recipiente con los dos líquidos fue entonces elevado lentamente hasta que la muestra estuviera completamente sumergida en la mezcla de agua y glicerina. En esta situación se supuso que el volumen del objeto poroso estaba delimitado por una capa queroseno y mezcla. Este volumen fue considerado como el volumen aparente.

Análisis de las muestras

A todas las muestras analizadas se les determinó el volumen aparente por medio de la nueva metodología como también por la técnica de la parafina (McIntyre, Loveday 1974), con el fin de comparar ambos métodos. Se prepararon agregados

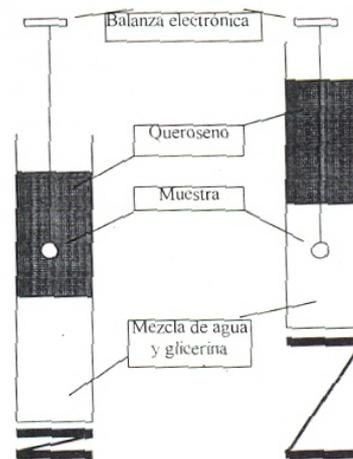


Figura 1. Dispositivo para la determinación de los pesos aparentes de una muestra porosa sumergida en dos líquidos inmiscibles.

Figure 1. Equipment to determine apparent weight of a porous sample immersed into two immiscible liquids.

artificiales mezclando diferentes proporciones de arena (10 - 70%), cemento (15 - 90%), y arcilla (15 - 70%). Las distintas combinaciones de estos materiales dieron como resultado diferentes densidades para volúmenes similares. Las densidades variaron entre 1,33 y 2,04 Mg m⁻³. Los volúmenes obtenidos fueron del orden de 5x10⁻⁶ m³ (moldes cúbicos y cilíndricos), o de 1,6x10⁻⁶ m³ a 2x10⁻⁶ m³ (moldes cilíndricos). Los moldes llenos se secaron en estufa durante dos días, a una temperatura aproximada de 105 °C. Las muestras de suelo se tomaron con cilindros (0,10 m de diámetro y 0,40 m de longitud) de un Argiudol Típico ubicado en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, de la Universidad Nacional de La Plata. Las mismas se dejaron secar a temperatura ambiente. La composición textural media de los agregados utilizados fue de 23% de arcilla, 50% de limo, 27 % de arena (zona superficial, 0 - 0,10 m), y de 31% de arcilla, 48% de limo, 21% de arena (profundidad de 0,30 a 0,40 m). Se estudiaron terrones de suelo con diámetros entre 4 y 20 mm.

Se registraron los pesos secos de las distintas muestras y las diferencias de peso indicadas por la balanza al pasar cada agregado saturado en queroseno desde este líquido a la mezcla de agua y glicerina. A continuación, las muestras se secaron, en estufa durante dos-tres días a 105°C, y pesaron nuevamente en aire (W_M). Luego se sumergieron en parafina líquida, suspendidas del mismo hilo utilizado previamente en el método de los dos líquidos, a una temperatura aproximada de 70 °C, para recubrirlas de una capa sellante. Los agregados, así impermeabilizados, se suspendieron de la balanza y pesaron, respectivamente, en aire (W_{CMA}) y sumergidos en agua (W_{CMW}).

El volumen del objeto poroso obtenido por el método de la parafina se calculó usando la siguiente ecuación:

$$V_{bulk} = \frac{W_{CMA} - W_{CMW}}{\rho_W} - \frac{W_{CMA} - W_M}{\rho_{PA}} \quad (9)$$

donde ρ_{PA} es la densidad de la parafina ($\rho_{PA} = 0,910$ Mg m⁻³) and ρ_W es la densidad del agua ($\rho_W = 1$ Mg m⁻³).

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2 se puede ver el comportamiento global de los valores de densidad aparente, ρ_{ap} , obtenidos con los métodos de recubrimiento con parafina y con el nuevo método de empuje en dos líquidos, propuesto en este trabajo. La recta que indica la relación 1:1 entre medidas fue incorporada, con el fin de observar el grado de ajuste. En el caso de las determinaciones efectuadas sobre agregados artificiales (Figura 2a), hubo un excelente ajuste entre los valores obtenidos

por ambos métodos. En cambio la Figura 2b revela que los valores de densidad aparente hallados, utilizando la técnica del recubrimiento con parafina, son generalmente superiores a los determinados con el empuje en dos líquidos.

Las diferencias entre los valores de densidad obtenidos por los dos métodos ensayados (recubrimiento con parafina y empuje en dos líquidos), se deben a que en el proceso de cálculo de ρ_{ap} en el primero de ellos, no se tuvo en cuenta la masa de parafina que invade los poros superficiales e interiores, cuyo volumen forma parte también del volumen aparente del agregado. Esto conduce, por lo general, a estimar volúmenes de agregados, más pequeños cuanto mayor es la porosidad que, además de estar en contacto directo con la superficie, penetra profundamente en el interior de las muestras. En definitiva, un mayor volumen de parafina ingresará en los poros desplazando la frontera que delimita el agregado hacia el interior del mismo. El mejor ajuste entre ambos métodos, revelado por línea

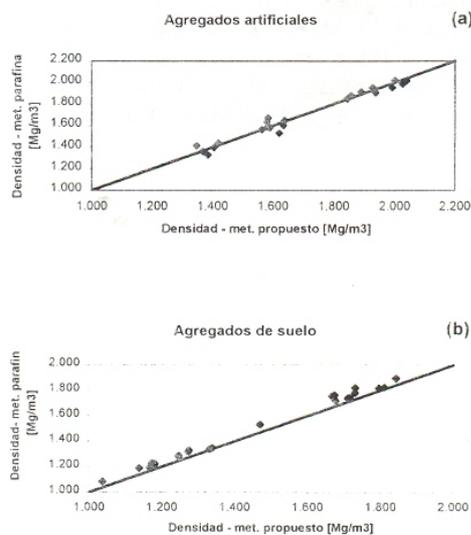


Figura 2. Densidad aparente de agregados artificiales (a) y agregados de suelo (b) determinada por el método de recubrimiento con parafina y por el método propuesto, de empuje en dos líquidos.

Figure 2. Comparison between apparent density of artificial aggregates (a) and soil aggregates (b) determined by the paraffin coated method and the proposed two-liquid pushing method.

1:1 en el caso de agregados artificiales, es debido a la menor rugosidad de las paredes de éstos. En el caso del método de los dos líquidos, la imbibición en el líquido 1 (menos denso) implica que un volumen de este líquido llene todos los poros hasta la superficie del material y permanezca en éstos cuando la muestra pasa al líquido 2. Aunque esto lleva a determinar volúmenes ligeramente mayores por esta técnica, en comparación con la del recubrimiento con parafina (Figura 2b), pensamos que el volumen aparente así estimado es más adecuado. Las diferencias relativas entre los valores de densidad aparente obtenidos por el método de la parafina y por el método propuesto, empuje en dos líquidos, atribuidas fundamentalmente al error sistemático del primer método, tuvieron un máximo de alrededor del 5%, lo cual puede ser considerado como aceptable.

Con la finalidad de estimar el error experimental debido al método propuesto, se reemplazaron los valores correspondientes a un caso representativo en las ecuaciones (7) y (8). Los datos son: $(\rho_{Mez} - \rho_Q) \approx 0,3 \text{ Mg m}^{-3}$, $g = 9,80 \text{ m/s}^2$, $d(\delta F) \approx 5 \times 10^{-5} \text{ N}$, $\delta F \approx 3 \times 10^{-4} \text{ N}$, $d(\rho_{Mez} - \rho_Q) \approx 4 \times 10^{-3} \text{ Mg m}^{-3}$, $m_s \approx 1,6 \text{ g}$, $dm_s \approx 0,005 \text{ g}$, $V_{ap} \approx 1,18 \times 10^{-6} \text{ m}^3$; mientras que los errores estimados son: $\Delta V_{ap} \approx dV_{ap} \approx 3,4 \times 10^{-8} \text{ m}^3 = 0,034 \text{ cm}^3$, $\Delta \rho_{ap} \approx d\rho_{ap} \approx 0,029 \text{ Mg m}^3$. Estos valores

son aceptables para las mediciones en agregados de suelo.

La técnica propuesta en este trabajo es apropiada para medir volúmenes y densidades aparentes de agregados de suelo y otros materiales porosos, más sencilla de utilizar que el método clásico de recubrimiento con parafina, y los líquidos que requiere son fáciles de obtener en el comercio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de La Plata y a la Fundación Campodónico, La Plata, Argentina, por el apoyo económico parcial.

REFERENCIAS

- Blake CR, Hartge KH. 1986. Bulk density. p. 363-375. *En: "Methods of Soil Analysis Part 1. 2nd Edition. Ed. A. Klute. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA. Madison. WI.*
- Chepil WS. 1950. Methods of estimating apparent density of discrete soil grains and aggregates. *Soil Sci.* 70:351-362.
- McIntyre DS, Loveday J. 1974. Bulk density. *En: Methods for Analysis of Irrigated Soils. Ed. J Loveday. Tech Commun No 54. Comm Bur Soils pp 38-42. (Comm. Agric. Bur. Farnham Royal, England).*
- Sadosky M, Guber R. 1964. Elementos de Cálculo Diferencial e Integral. Editorial Alsina. p. 161-163.

