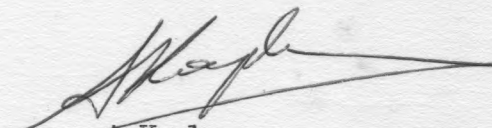


927

EVALUACION DE UN METODO PARA DETERMINAR DENSIDAD
APARENTE, MACROPOROSIDAD Y MICROPOROSIDAD
EN EL SUELO

(tesis Ingeniero Agrónomo)

F. García


A. Kaplan

Montevideo, febrero 1974

INDICE

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	2
2.1 Densidad aparente	3
2.2 Porosidad	9
2.2.1 Porosidad total	9
2.2.2 Fraccionamiento de la porosidad por tamaño	10
3. MATERIALES Y METODOS	14
3.1 Materiales y diseño de muestreo	14
3.2 Métodos	15
3.2.1. Fundamento	15
3.2.2 Operaciones y cálculos	16
3.2.3 Procedimientos estadísticos	22
4. RESULTADOS Y DISCUSION	26
4.1 Comparación entre volumen medido con alcohol y el volumen calculado	33
4.2 Comparación de la variación introducida por el método frente a la macrovariación	34
4.3 Comparación entre usar el volumen que toma el muestreador o el volumen medido	38
4.4 Número de puntos y muestras por punto que se deben tomar	38
4.5 Correlaciones simples entre densidad aparente y contenido de materia orgánica, y macroporosidad y contenido de materia orgánica	42
5. RESUMEN	44
Agradecimientos	46
6. BIBLIOGRAFIA	47

INTRODUCCION

El presente trabajo forma parte de la investigación que realiza el Grupo de Suelos de la Facultad de Agronomía, cuyo objetivo es la caracterización más completa de las distintas propiedades de los suelos del Uruguay. En particular encuadra en la línea de caracterización de propiedades físicas.

La investigación realizada hasta el presente en manejo de suelos y cultivos en la Facultad de Agronomía, en especial el estudio del manejo de la fertilidad de varios cultivos en suelos de texturas medias y pesadas, permite inferir que las propiedades físicas de los mismos son limitantes para el crecimiento de las plantas.

En un suelo perteneciente al Gran Grupo Praderas Pardas de diferenciación media en la Clasificación de Suelos del Uruguay (Durán y Marchesi, 1969), de la zona 10 del mapa de la C.I.D.E. (1967), Durán y Kaplan (1965) encontraron 9 % de macroporosidad en el horizonte A, 1,5% en el B_{2t} y 8% en el B_3 . En suelos típicos de la zona 11 de la C.I.D.E., los mismos autores encontraron que la macroporosidad del horizonte A variaba entre 7,5 y 9%, en el horizonte B_{2t} entre 3 y 6,5% y en el B_3 era prácticamente nula. Baver (1956) cita a Kopecky (1927), quien propuso que los rangos de valores de macroporosidad óptimos para los cultivos que se enumeran son: Sudan grass, 6 a 10%; trigo y avena, 10 a 15%; cebada y remolacha, 15 a 20%. A pesar de que el método empleado por Durán y Kaplan no es satisfactorio, los valores que determinaron, comparados con los propuestos por Kopecky, reafirman la conclusión del párrafo anterior.

El crecimiento de las raíces, y la dinámica del aire y del agua en los suelos, están regulados por la magnitud y el tipo de porosidad que poseen, así como por la variación de estas propiedades físicas en el perfil (Baver, 1956; Vomocil, 1965). A su vez, la distribución y permanencia de un determinado espacio poroso depende de la textura y del tipo y estabilidad de agregación de las partículas (Strickling, 1955). Por lo tanto todas las determinaciones

físicas que se realizan en relación con el crecimiento de las raíces, y la dinámica del aire y del agua, son evaluaciones indirectas del tipo de agregación, su estabilidad, y de la textura.

Surge de lo anterior, que el primer paso en la caracterización física de los suelos, es el estudio de la textura, el espacio poroso, el tipo de agregación y su estabilidad, en los distintos horizontes del perfil.

Los trabajos realizados en el país en física de suelos, son los siguientes:

- a) El trabajo ya mencionado de Durán y Kaplan (1965) en que se determinó la densidad aparente, macroporosidad y microporosidad de los diferentes horizontes del perfil, en los suelos de las Estaciones Experimentales de la Facultad de Agronomía en Sayago, Paysandú y Ballado de Medina.
- b) Determinación del agua disponible para las plantas, y del efecto de la textura en esta propiedad en un amplio rango de suelos del Uruguay (Labella y Alvarez, 1969; Hofstadter, 1972).
- c) Determinación de la velocidad de infiltración y la permeabilidad de los distintos horizontes del perfil en los suelos de la cuenca de la Laguna Merín (Hofstra, 1969), o del horizonte B_{2t} en algunos suelos del litoral (Améndola, inédito).
- d) Crecimiento de raíces en el horizonte B_{2t} de algunos suelos del litoral (Améndola, inédito).
- e) Efectos de diferentes sistemas de cultivo en la densidad aparente (C. de Inv. Agr. "Alberto Boeger", 1971).
- f) Determinación de la composición mecánica de los distintos horizontes del perfil en los suelos muestreados en todos los trabajos de relevamiento mencionados en el país (P. O. L. S., Lab. de física de suelos de

la Facultad de Agronomía, Archivo).

El gran inconveniente con que se tropieza en el estudio de las propiedades físicas de los suelos, es la falta de una metodología suficientemente de sarrollada y universalmente aceptada salvo algunas excepciones. Esto se ve agravado en nuestras condiciones por la falta de equipos suficientes. De modo que hay que desarrollar metodologías o probar y comparar las ya desarrolladas cuando el equipo lo permite.

En el caso de las determinaciones de la densidad aparente, macroporosidad y microporosidad, que es el objeto de este trabajo, se optó por corregir los de fectos de la metodología empleada por Durán y Kaplan (1965), debido fundamental mente a que se contaba con los medios necesarios.

En este trabajo se evalúan dos modificaciones alternativas del método cita do mediante procedimientos estadísticos. Se cuantifica el error de las determi naciones. Y se evalúa la variabilidad de las propiedades medidas, y el número de muestras a tomar en una superficie con suelo homogéneo (por ejemplo una unidad de mapeo detallado), para tener un nivel de error aceptado con cierta probabili-
dad.

REVISION BIBLIOGRAFICA

A continuación, se resume la metodología empleada para la determinación de los parámetros que ocupan a este trabajo en la bibliografía revisada. En cada caso, se discuten ventajas e inconvenientes de los procedimientos.

2.1 Densidad Aparente

La densidad aparente es la razón entre la masa de los sólidos del suelo y el volumen aparente que ocupan (volumen imperturbado, volumen del suelo en su estado natural que incluye el espacio poroso). Este valor se utiliza para transformar porcentaje de humedad gravimétrico en volumétrico, para calcular

la porosidad total como se verá en el ítem 2.2.1, o para calcular el peso de un volumen muy grande de suelo que no se puede pesar como por ejemplo el que tiene una há. de terreno (Blako, 1965 b). También se usa en estudios sobre génesis, para expresar en términos volumétricos, pérdidas y ganancias de sustancias en los horizontes del perfil.

La densidad aparente, varía estrechamente con la porosidad del suelo, y como se dijo en la introducción, las variaciones del espacio poroso dependen de las variaciones de la textura y la estructura del suelo. Es por esto, que la densidad aparente se usa corrientemente para evaluar el estado estructural de un suelo determinado bajo distintos sistemas de manejo (p. ejem. C. de Inv. Agr. "A. Boerger", 1971). También se la ha usado por su relación con el espacio poroso, como una medida de las propiedades del suelo que afectan la penetración de raíces. Zimmerman y Kardos (1961), encontraron que las raíces no pueden crecer en materiales con más de 1,8 a 1,9 de densidad aparente.

Los métodos utilizados para determinar la densidad aparente se pueden dividir en tres categorías:

- a) Los que toman muestras imperturbadas para determinar el volumen aparente y el peso seco (normalmente a 105°C).
- b) Los que toman muestras perturbadas para determinar el peso seco, y miden el volumen que ocupaba dicha muestra en el campo.
- c) Los que no toman muestra.

Dentro de la categoría a, el procedimiento más común consiste en tomar muestras imperturbadas con un dispositivo generalmente cilíndrico que se clava en el suelo a la profundidad deseada. En esta categoría entra el método usado en este trabajo. El dispositivo toma un volumen determinado de suelo imperturbado al

que posteriormente se lo determina el peso seco. El procedimiento general^{mente} no sirve en suelos con piedras (Blake, 1965 b). Un problema importante radica en elegir el contenido de humedad en el momento del muestreo. A pesar de que es imposible evitar cierta compactación, esta es máxima con contenidos de humedad por encima de capacidad de campo; a su vez, si el suelo está demasiado seco la presión puede romper agregados (De Loonheer, 1967a). Además la compactación y la perturbación son mayores si los muestreadores se introducen a martillazos que si se introducen con una presión pausada y uniforme (Bavor, 1956; De Boodt, 1965, De Loonheer, 1967a). El tamaño de las muestras también influye en la deformación (Bavor, 1956; De Loonheer, 1967). De Loonheer (1967 a), recomienda que las muestras no tengan más de 4 cm. de altura.

Miller (1966), estudió el efecto de los contenidos de humedad, arcilla y materia orgánica en el volumen aparente y encontró que el contenido de humedad es la variable que más influye en los cambios de volumen. De Loonheer (1967a) y Durán & Kaplan (1965), encontraron cambios en las diferentes fracciones de poros y en la porosidad total según la época del año en que se efectuó el muestreo, debido a los cambios en el contenido de agua del suelo.

Sin embargo, De Loonheer, (1967 a), señala que generalmente se ha utilizado como volumen para calcular la densidad aparente el que saca el dispositivo muestreador sin considerar el contenido de humedad de las muestras. También sobre este volumen se calcula la porosidad total, y las fracciones que se separan dentro de ella. Hartge (1966), citado por De Loonheer (1967a), utilizando este tipo de cálculo, encontró que la porosidad total (ver la ecuación 1 en 2.2.1) puede ser menor a la porosidad que retiene el agua contra una succesión de 10 cm. de agua. Durán y Kaplan (1965), encontraron en suelos muy expansivos el mismo fenómeno que Hartge, la porosidad total era inferior a la porosidad capilar determinada como la cantidad de agua que una muestra saturada es capaz de retener contra la fuerza gravitacional. Esta contradic-

ción se explica como sigue. Al determinar la densidad aparente utilizando como volumen aparente el que toma el dispositivo muestreador, la porosidad total calculada según la fórmula (1) es el porcentaje de poros que tienen las muestras con el contenido de agua del momento del muestreo. Si este contenido de agua está por debajo del contenido al que se produce la máxima expansión, al saturar las muestras en el laboratorio para determinar las distintas fracciones de poros, cambian los volúmenes aparentes por un aumento de la porosidad capilar. Por lo tanto, si el valor absoluto de esta última se expresa como porcentaje del volumen en el momento del muestreo, bien puede ocurrir que resulte mayor al porcentaje anteriormente calculado de porosidad total. La factibilidad de cometer este error es mayor en los suelos u horizontes expansivos, que en el Uruguay son frecuentes. Lamentablemente, de lo anterior se concluye que los datos obtenidos en base al volumen en el muestreo sin considerar el contenido de humedad no sirven como referencia ni tienen valor comparativo (De Leonheer, 1967 a).

Es de la mayor importancia estandarizar el contenido de humedad al que se realiza el muestreo o al que se mide el volumen aparente de las muestras. Esto ya era enfatizado por Baver (1956), y De Boodt (1960), De Boodt (1965), y De Leonheer (1967 a) proponen que el contenido de humedad en el muestreo sea el correspondiente a capacidad de campo. En este contenido de humedad, la expansión del suelo (que se supone ha llegado al máximo) está en equilibrio con el contenido de agua (De Leonheer, 1967).

Miller (1966), presenta un procedimiento para ajustar la densidad aparente de las muestras al contenido de humedad de capacidad de campo. Fox (1964), estudió la relación entre la humedad del suelo y la densidad aparente, en un suelo expansivo durante cuatro años. Basándose en algunos supuestos, desarrolló modelos matemáticos para predecir la expansión del suelo estudiado dentro de ciertos rangos definidos de contenido de humedad.

En el método evaluado en este trabajo se define el contenido de humedad al que es medido el volumen aparente.

Otro método ubicable en la categoría 8a es el conocido como el método del agregado o terrón parafinado. Consiste en determinar la densidad aparente de un agregado o un terrón al que se le determina el peso seco, y cuyo volumen se mide por el principio de Arquímedes. Para ello el agregado o terrón debe recubrirse con una delgada película de un material (normalmente parafina aunque se usan otros) que impida que ~~se~~ penetre agua, y lo mantenga coherente (Blake, 1965 b; De Boodt, 1965).

Nuevamente se ~~presenta~~ el problema del contenido de humedad al que se determina el volumen. Los terrones utilizados se secan al aire, por lo que su volumen, debido a la contracción que produce el secado, es menor que el volumen a capacidad de campo, que es el que más interés presenta.

Sokora (1931), citado por Baver (1956), determinó el volumen de agregados saturados de agua midiendo el desplazamiento producido por inmersión de agregados saturados (sin recubrimiento) en aceite mineral. Este procedimiento, como se verá, tiene cierta similitud con una de las alternativas de determinación del volumen aparente utilizadas en el presente trabajo.

El mayor inconveniente que presentan los métodos de esta categoría es que no toman en cuenta la parte de la macroporosidad que componen los espacios entre los agregados. De manera que los valores de densidad aparente obtenidos, son mayores a los que se obtienen por otros métodos (Baver, 1956; Blake, 1965 b).

Un procedimiento perteneciente a la categoría b es el método llamado de la excavación por Blake (1965 b), que también aparece citado por Baver (1956). Consiste en abrir un agujero en el punto del perfil bajo consideración. Este agujero puede tener las dimensiones que se deseen, lo cual es una gran ventaja puesto que permite estudiar la densidad aparente de capas muy delgadas como son, por ejemplo, las que produce el arado por compactación. El material

excavado debe ser cuidadosamente recogido para luego de secarlo a 105°C obtener el peso seco. El volumen se mide vertiendo dentro del agujero, hasta llenarlo, arena fina, o un líquido luego de impermeabilizar las paredes y el fondo de la excavación con una delgada película de algún material apropiado. Tanto el líquido como la arena deben provenir de un recipiente graduado, donde se pueda medir exactamente cuanto se agregó. Este método es muy útil en suelos con piedras mezcladas en la masa (Blake, 1965 b; Shipp y Matolski, 1965). Se determina la densidad aparente al contenido de humedad del momento del muestreo.

Dentro de la categoría c están los métodos que se basan en transmisión o disipación de radiación. La base de estos procedimientos, es que la transmisión de radiación gamma (que es usada normalmente) a través del suelo, o la disipación de dicha radiación dentro del suelo, varía con las propiedades del suelo, incluida la densidad aparente. Por medio de una calibración adecuada, las medidas de transmisión o disipación de rayos gamma se pueden usar para estimar la densidad aparente (Blake, 1965b).

En la técnica de transmisión, se introducen dos sondas, separadas a una distancia fija determinada, en agujeros abiertos previamente hasta la profundidad deseada. Una es un contador Geiger, que detecta la radiación emitida a través del suelo por la otra que es una fuente de rayos gamma. En la técnica de disipación, se utiliza una sola sonda que contiene al emisor y al detector de rayos gamma separados por una guarnición en el mismo dispositivo. Se puede usar en la superficie del suelo o en pozos según el diseño del aparato.

La técnica de transmisión, permite medir la densidad aparente de capas de unos pocos centímetros en sentido vertical a cualquier profundidad en el perfil. La técnica de la disposición mide la densidad aparente de una "muestra esférica" de 20 a 75 cm. de diámetro según las características del aparato y del suelo (Blake, 1965 b).

La medida que se hace, es en realidad la densidad de todas las fases combinadas que forman el suelo. La densidad de los gases se desprecia pero se debe medir el contenido de agua del suelo en el momento de la medida y hacer una corrección al dato para obtener la densidad aparente en base seca. Es por eso que el desarrollo de esta técnica, está muy relacionada al desarrollo de la técnica de determinación de humedad por el método de disipación de neutrones (De Boodt, 1965).

Este método tiene las ventajas siguientes: 1º) la perturbación del suelo que se hace es mínima, 2º) la medida es casi instantánea, 3º) se pueden hacer varias repeticiones en el mismo lugar, y 4º) se accede al subsuelo con una mínima excavación (Blake, 1965 b).

La última ventaja mencionada, también la posee el método que se evalúa en este trabajo. Sin embargo, debido a que el aparato muestreador se encuentra montado sobre un vehículo está en desventaja frente a los métodos de radiación para hacer medidas durante el crecimiento de un cultivo.

Cabe señalar, que en todos los métodos de las categorías a y b mencionados, las muestras se deben obtener dentro de calicatas si no se posee un aparato hidráulico o similar. Lo anterior constituye un grave inconveniente.

2.2 Porosidad

2.2.1 Porosidad Total

El procedimiento que se sigue normalmente para determinar la porosidad total se basa en la ecuación siguiente:

$$\text{Porosidad total (\%)} = (1 - \text{densidad aparente/densidad real}) 100.$$

En esta fórmula, la porosidad total está expresada como porcentaje del volumen aparente de la muestra utilizada (Baver, 1956, Vomo

cil, 1965; De Boodt, 1965; De Leenheer, 1967 a).

Como surge de la ecuación (1), se deben conocer las densidades aparente y real del material en cuestión. La densidad aparente ya fue discutida. En cambio, conviene discutir que valor de densidad real se debe utilizar.

Comunmente se usa el valor 2.65, promedio de la densidad del cuarzo y los feldespatos, en forma estandar. Sin embargo, se ha constatado que la densidad real varía significativamente con el contenido de materia orgánica.

De Leenheer, y Van Ruymbelke (1960), citados por De Boodt (1965) y De Leenheer (1967 a), señalan que se debe disminuir la densidad real de 2.65 en 0.02 por cada uno por ciento de aumento en la materia orgánica, si el contenido de la misma es mayor que uno por ciento. La regla no es válida para contenidos de materia orgánica mayores de 5%, en cuyo caso se debe determinar directamente. En el presente trabajo, en que se utilizó un suelo con un contenido de 2.84% en promedio de materia orgánica, la densidad real determinada fue 2.545 ± 0.015 . Vonocil (1965), señala que para obtener la porosidad total con la ecuación (1), se debe determinar la densidad real directamente.

2.2.2 Fraccionamiento de la porosidad por tamaño

El fraccionamiento corriente de la porosidad según rangos de tamaño de los poros, depende de la aceptación de un modelo capilar para el espacio poroso (Vonocil, 1965). Imagínese un conjunto de tubos capilares de la misma longitud pero con diferentes diámetros; y además, que la cantidad de tubos es distinta para cada diámetro particular. Supóngase que cada capilar tiene una pe-

pequeña contracción en un extremo. Considérese que el conjunto de capilares se sumerge en agua con los extremos con la contracción hacia arriba. Si los diámetros de los tubos son suficientemente pequeños, se pueden sacar del agua y van a permanecer llenos. Ahora imagínese que se aplica una presión negativa o succión en el extremo inferior de los tubos. A medida que la succión aumente el agua será extraída de los tubos en los que la fuerza de retención capilar del agua en la contracción, se vea superada por la succión. El concepto de la pequeña contracción se usa para tener un modelo en el que cada tubo puede estar o completamente lleno, o completamente vacío a una determinada succión.

El comportamiento descrito responde a la ley de ascenso capilar:

$$h = 2\gamma \cos \phi / \rho g r \quad (2)$$

donde h es la altura a que ascenderá el líquido en un capilar sinátrico de radio r , γ es la tensión superficial del líquido, ρ su densidad y g la aceleración de la gravedad. Para el agua, se puede asumir que el ángulo de contacto entre el líquido y la mayoría de los sólidos del suelo (ϕ) es aproximadamente cero, por lo que $\cos \phi$ es aproximadamente igual a uno. La presión que tiene que vencer un poro de radio r que se mantiene lleno de agua es $2\gamma/r$. Como p es constante para el agua a una temperatura determinada, h representa la succión necesaria para vaciar un tubo capilar de radio mayor que r (Baver, 1956; Vomocil, 1965; Slatyer, 1967). Las presiones y succiones se pueden expresar en cm. de agua.

Si se extrae agua de una muestra de suelo imérturbada y saturada de agua, por medio de una succión h , el volumen de agua extraído es igual al volumen de poros que tienen un radio efectivo mayor que el valor de r , obtenido incluyendo h en la ecuación (2).

Obviamente, el espacio poroso del suelo no se ajusta completamente al modelo capilar planteado. Sin embargo si se acepta la teoría capilar, el radio calculado con la ecuación (2) para una succión de 344 cm de agua, representa al menos, el mínimo radio de una parte de un poro a través del que puede moverse la interfase agua-aire durante el drenaje, es decir, el límite entre los poros que no retienen. Por lo tanto, el procedimiento brinda una información descriptiva del espacio poroso del suelo (Venocil, 1965).

El cálculo de los porcentajes de las distintas fracciones de poros debe hacerse en base a un valor de volumen aparente medido a un contenido de humedad precisamente definido; preferentemente capacidad de campo (De Loonheer, 1967 a).

El principal componente de los aparatos de medida es una membrana permeable, o un plato de porcelana porosa que permiten el pasaje de agua, pero que cuando húmedos son impermeables al aire (u otros gases) dentro de un rango de valores de presión. Una descripción acabada de los aparatos utilizados puede verse en los trabajos de Venocil (1965) o Richards (1965).

Se puede fraccionar la porosidad sin aplicar presiones (negativas o positivas), dejando drenar las muestras saturadas hasta que no cambia su peso, si se evita la evaporación. De esta manera, se obtiene un porcentaje de poros que no retienen el agua contra la fuerza gravitacional (macroporos), y otro porcentaje de poros (microporos) que la retienen. Este procedimiento citado por Baver (1956), lo usaron Durán y Kaplan (1965) y se utilizó en el presente trabajo. El primer grupo de poros tendría, aproximadamente, un radio mayor a 4.3 micras; y el segundo, menor o igual a 4.3 micras. Este valor de r se obtiene tomando un valor h de 344 cm de agua en la ecuación (2). Aproximadamente, 344 cm. de agua es la succión con que el agua del suelo está retenida a capacidad de campo $\frac{1}{2}$ el agua contra la fuerza gravitacional y los que la retienen.

(De Boodt, 1965; De Loonhoer, 1967 a). Se asume que luego de perder el agua gravitacional, el suelo está a capacidad de campo (Bavor 1956).

Como surge de lo anterior, las determinaciones se hacen exclusivamente por extracción de agua de muestras saturadas. Esto es debido al fenómeno de histéresis (De Loonhoer, 1967 a), Slatyer, 1967; Black, 1967).

De Boodt (1965) y De Loonhoer (1967 a), presentan prácticamente el mismo esquema de fraccionamiento del espacio poroso en distintas categorías por tamaño. Es útil usar un esquema como el citado, porque brinda información para muchos propósitos. Pero hay que subrayar, que al menos se deben separar los poros que no retienen el agua contra la gravedad de los que la retienen. El primer tipo de poros se suele usar como índice de la aereación del suelo (Bavor, 1956; Black, 1967), tiene una estrecha relación con la conductividad hidráulica en flujo saturado, y también es índice de la facilidad de arraigamiento.

Gerard et al. (1965), estudiaron el espacio poroso del diámetro mayor a 20 micras por técnicas micromorfológicas. Bavor (1965) cita trabajos similares realizados por diversos autores.

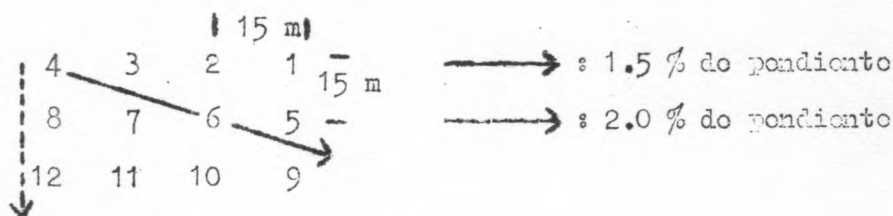
A veces, interesa conocer el espacio poroso lleno de aire en un momento dado. Este valor, obviamente, no puede usarse con fines de caracterización. Vonocil (1965), presenta detalladamente tres técnicas diferentes para realizarlo; una de las cuales, la del piónómetro, también está bien discutida por Bavor (1956). Prihar y Verma (1969), presentan una técnica sencilla para efectuar la misma determinación. El común denominador de estos procedimientos es su sencillez y la rapidez con que se efectúan las medidas.

MATERIALES Y METODOS

3.1 Materiales y Diseño de Muestreo

Dado que el interés era evaluar el método, no sólo con fines de caracterización, sino también a los efectos de evaluar el resultado de diferentes sistemas de manejo en las propiedades físicas medidas, se eligió probarlo en una chacra vieja, en la zona pagera del sur del Dpto. de San José (Kiyú), que había tenido papa como último cultivo. En el momento del muestreo estaba en barbecho. Está ubicada en una ladera ligeramente convexa en su parte superior y plana en su parte inferior. La pendiente, en el sentido de su mayor longitud, es muy suave (1.5%).

El diseño de muestreo empleado, es una adaptación del utilizado por Fiel-
ding Reed y Rigney (1947). Se esquematiza a continuación:



Los puntos de muestreo se ubicaron separados a 15 metros en forma equidistante. Se muestrearon 12 puntos, y en cada punto se tomaron 12 muestras en una pequeña área de un metro cuadrado aproximadamente.

Taxonómicamente, el suelo estudiado es una Pradera Parda Máxima según la Clasificación de Suelos del Uruguay (Durán y Marchosi, 1969). Está formada sobre lodolitas cuaternarias de la Formación Libertad (Bossi, 1969).

A continuación se enumeran sus principales características morfológicas. Posee un horizonte superficial de 25 centímetros (Ap), de color pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2), y textura franco limosa, con algunas concreciones de Fe y Mn de un milímetro de diámetro en su parte inferior. Hay una transición abrupta a un horizonte subsuperficial (B2t) de 35 centí-
metros.

tros de espesor, color negro a gris muy oscuro (10 YR 2.5/1), arcillo li-
noso, con concreciones comunes de Fe y Mn de uno a dos milímetros de diá-
metro. A partir de los 60 centímetros de profundidad, el suelo pasa en for-
ma gradual al material madre de color pardo (7.5 YR 5/4), y textura franco
arcillo limosa a arcillo limosa.

Se pretendió seleccionar un suelo genéticamente homogéneo, pero no se pudo
evitar cierta variación, fundamentalmente en grado de desarrollo y espe-
sor del horizonte A. Es así que en la ladera media (puntos 6 y 7) apare-
ce un horizonte A2 incipiente de uno a dos centímetros de espesor, y en
la parte inferior de la misma (puntos 1, 5, 9) un A2 de cinco centímetros
a la vez que el espesor total del horizonte A es mayor (30 cm). Por lo tan-
to, en esta última parte, el suelo sería un intergrado a Planosol.

3.2 Métodos

3.2.1 Fundamento

En el método empleado, la densidad aparente se determina como el
cociente entre el peso seco de la muestra imperturbada, y el máximo vo-
lumen aparente que puede alcanzar. La microporosidad, es la diferencia
en contenido volumétrico de agua entre capacidad de campo y el peso se-
co a 105°C, expresada en porcentaje del volumen aparente. La macroporo-
sidad, es la diferencia en contenido volumétrico de agua entre satura-
ción y capacidad de campo, expresada en porcentaje del volumen aparente.
Adelante, se verá que finalmente se optó por determinar la macroporosi-
dad, como la diferencia entre la porosidad total y la microporosidad.
Las diferencias volumétricas de contenido de agua, se midieron como
diferencias en peso asumiendo que la densidad del agua es la unidad.

Importa explicar la razón de tomar el máximo volumen aparente. Como
se vió en 2.1, no hay expansión por encima de capacidad de campo, y

por eso se propone usar el volumen del dispositivo muestreador cuando el suelo está a capacidad de campo en el muestreo (De Boodt, 1960; De Boer 1965; De Loonheer, 1967 a). Para ello, los autores citados proponen que el muestreo se realice luego de las lluvias de invierno, cuando el suelo está a capacidad de campo en el comienzo de la primavera. Esto presenta el grave inconveniente, de tener sólo una temporada muy restringida en que se puede muestrear y en ~~muestras~~ condiciones, es muy difícil encontrar un momento en que todo el perfil (A y B) esté a capacidad de campo. El método evaluado en este trabajo, se basa en medir el volumen de las muestras luego de ser saturadas en el laboratorio, ya que de acuerdo con De Loonheer (1967 a), no debe diferir del volumen a capacidad de campo. Esto permite tener una temporada de ~~muestreo~~ bastante más amplia. Sin embargo, no conviene muestrear a muy bajos contenidos de humedad por dos razones: a) para ovitar ruptura de agregados y más perturbación que la normal (De Loonheer, 1967 a), y b) por el fenómeno de histéresis (Slatyer, 1967; Black, 1967; De Loonheer, 1967 a).

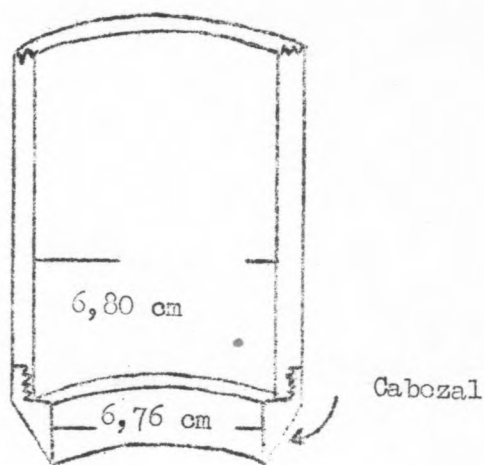
Otra razón importante para tomar el máximo volumen aparente como estandar es que en base a él se determina la macroporosidad que existe cuando el contenido de agua es el óptimo para las plantas (capacidad de campo), y que determina la aereación del suelo en estas condiciones, en las que es más impor tante saber si es o no limitante.

3.2.2 Operaciones y Cálculos

Se muestreó el horizonte A1 entre 5.67 y 14.0 centímetros de profundidad. Las muestras se tomaron con un contenido de humedad en promedio que era el 85,8% del contenido a capacidad de campo.

Para tomar las muestras, se utilizó un aparato hidráulico montado sobre un vehículo, y accionado por el motor del mismo. Este aparato introduce y levanta del suelo un tubo de 1,20 metros de largo y 6,76 cm. de diámetro interno en el cabezal, cuyo filo forma ángulo con la vertical hacia afuera del tubo (ver fig. 1). Inmediatamente a continuación del cabezal, el tubo es ligeramente más ancho, por lo que la muestra no cae al levantar el tubo. Con este aparato se pueden tomar muestras hasta 3 metros de profundidad. El filo del cabezal se lubrica levemente para disminuir la fricción.

Corte longitudinal del extremo del tubo muestreador



El tubo se introduce, hasta que tome algo más que la zona que se desea estudiar. Luego de extraído, la muestra de suelo se empuja cuidadosamente fuera del tubo, hasta que aparezca la parte que interesa estudiar. Este segmento, se rodea con dos abrazadoras que forman un pequeño tubo de 6,76 cm. de diámetro interno y 8,33 cm. de altura. Posteriormente, se corta la muestra contra los bordes de las abrazadoras con una sierra de cortar metales. De esta manera se obtiene una muestra importurbada de 298,97 cm³ con la humedad del momento del muestreo. Se quitan las abrazadoras con cuidado, y se rodea la muestra con una faja de material.

plástico que se sujeta contra la muestra con bandas de goma. La faja lleva una identificación para la muestra. Contra la base de la muestra se coloca un trozo de lienzo que también se sostiene con una banda de goma. La faja plástica oficia de recipiente de la muestra, en tanto el trozo de lienzo evita que se desmorone la muestra en la base, cuando se satura de agua en el laboratorio, como se explica adelante. Luego, la muestra es pesada en el campo, se ubica en una bolsa de nylon que se cierra herméticamente, y se transporta al laboratorio.

El procedimiento descrito para obtener muestras imperturbadas, al igual que los citados en la revisión bibliográfica, provoca cierta deformación de las muestras. En el presente trabajo, se estimó que se produce una compactación de alrededor de 2.6% en el volumen de las muestras, que debe afectar la macroporosidad.

Una vez que las muestras llegan al laboratorio, se colocan en cubetas con agua, apoyadas sobre rejillas. El nivel del agua en las cubetas, llega casi hasta el borde superior de las muestras. En 24 horas, todas presentan una película de agua libre sobre la base superior, que indica que están saturadas. A todas las muestras se les determina en estas condiciones, el peso, al que posteriormente se resta el peso de los envoltorios (faja plástica y lienzo saturado) para obtener los pesos de las muestras saturadas.

Al llegar a este punto, en el presente trabajo se dividieron las 12 muestras provenientes de cada punto en dos grupos de 6 muestras. Por comodidad, los llamaremos grupo A y grupo B. A las muestras del grupo A, se les midió el volumen aparente al estado de saturación, determinando el volumen de alcohol 90° que desplazan al ser sumergidas en un recipiente con dicho líquido. Las muestras se sumergieron

dentro del alcohol rodeadas de la faja plástica, pero sin el lienzo en su base. Por separado, se determinó de la misma forma el volumen de la faja y el de una cansatilla de metal en la que las muestras se sumergen y se extraen del alcohol. Estos volúmenes, se sustraen del total del alcohol desplazado obteniéndose el volumen de cada muestra.

Se utilizó alcohol, por ser un líquido no polar, lo que teóricamente evita que el agua que ocupa los poros de la muestra saturada, sea sustituida por el alcohol, y que exista dispersión del material en ambas bases de la muestra, en contacto directo con el alcohol. Afortunadamente, se cumplieron las suposiciones teóricas, ya que la densidad del alcohol permaneció incambiada, luego de proceder a la determinación del volumen de muchas muestras saturadas de agua, sin reemplazar el alcohol usado. Esto indica que el agua no salió de las muestras, y por lo tanto, no se mezcló con el alcohol alterando su densidad. El hecho citado, se verificó varias veces, debido a que la determinación del volumen de alcohol desplazado por las muestras, se efectuó obteniendo el peso de alcohol desplazado y calculando su volumen a través de su densidad. Esto obligó a efectuar numerosos chequeos del valor de la densidad del alcohol, que permitieron comprobar que no cambiaba. También se observó que no hubo dispersión de material, en las partes de la muestra en contacto con el alcohol, excepto una cantidad despreciable de material ya disperso por el manipuleo anterior.

Luego de retiradas las muestras del recipiente con alcohol, se les restituyó el lienzo en su base inferior.

A las muestras del grupo B, no se les determinó el volumen aparente saturado por desplazamiento de alcohol, sino que se les calcu-

16 dicho volumen, junto con las muestras del grupo A, por un proce
dimiento que se describe adelante.

Posteriormente, ambos grupos de muestras se manejaron en forma si-
milar. Se ubicaron sobre una rejilla donde se las dejó drenar el
agua gravitacional, en una atmósfera saturada para evitar evapora-
ción. Esto se logró, suspendiendo una tela gruesa húmeda por enci-
ma de la rejilla con las muestras. Luego de 24 horas no se detecta-
ron cambios en los pesos de las muestras, lo que indicó que no per
dían más agua gravitacional y estaban a capacidad de campo. En es-
te ~~momento~~, se les determinó nuevamente el peso descontando los en
voltorios.

A continuación se retiraron los envoltorios de todas las muestras,
se las ubicó en vasos de bohemia con identificación, y se las secó
en estufa a 105°C hasta que no se verificaron cambios de peso (18
horas). De esta manera, descontando el peso de los vasos de bohemia
se obtuvo el peso seco de las muestras.

En muestras compuestas de cada punto de muestreo, se efectuaron una
determinación de la densidad real por el método del picnómetro (Blake,
1965 a), una determinación del contenido de materia orgánica por el
método Walkley & Black (Allison, 1965), y una determinación de la
textura por el método internacional de la pipeta (Day, 1965).

A todas las muestras, inclusive las del grupo A, se les calculó el
volumen aparente en condiciones de saturación de la manera siguientes:

Volumen aparente = Volumen poroso + Volumen de los sólidos; donde:

$$\text{Volumen poroso} = \frac{(\text{peso de la muestra satur.} - \text{peso de la muestra seca a } 105^{\circ}\text{C})}{\text{densidad del agua}}$$

$$\text{Volumen de los sólidos} = \frac{\text{Peso de la muestra seca a los } 105^{\circ}\text{C}}{\text{Densidad real del punto de muestreo al que pertenece la muestra}}$$

La densidad aparente se determinó mediante la relación:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso de la muestra seca a } 105^{\circ}\text{C}}{\text{Volumen aparente de la muestra}}$$

Para cada muestra se tomó el volumen aparente calculado, y para las del grupo A, se calculó además sobre el volumen aparente medido por desplazamiento de alcohol, y se determinó el promedio en cada punto de muestreo sobre el volumen tomado por el muestreador.

La microporosidad se calculó como sigue:

$$\text{Porcentaje de microporos} = \frac{(\text{Peso de la muestra a cap. de campo} - \text{Peso de la muestra seca a } 105^{\circ}\text{C})}{\text{volumen aparente}} \cdot \frac{\text{Densidad del agua}}{1.00}$$

Para las muestras del grupo A, el valor se determinó sobre el volumen aparente calculado y sobre el volumen aparente medido con alcohol. Además se determinó el promedio en cada punto sobre el volumen tomado por el muestreador.

La macroporosidad se calculó de dos maneras:

Procedimiento 1:

$$\text{Porcentaje de macroporos} = \frac{(\text{Peso de la muestra saturada de agua} - \text{Peso de la muestra a cap. de campo})}{\text{volumen aparente}} \cdot \frac{\text{Densidad del agua}}{1.00}$$

Para las muestras del grupo A, el valor se determinó sobre el volumen aparente calculado, y sobre el volumen aparente medido por desplazamiento de alcohol.

Procedimiento 2:

$$\text{Porcentaje de macroporos} = \frac{\text{Porcentaje de porosidad total}}{\text{Porcentaje de micro poros.}}$$

La porosidad total se calculó con la fórmula (1) vista en 2.2.1.

Este procedimiento, se utilizó sólo para las muestras del grupo A, usando en todos los cálculos el volumen medido por desplazamiento de alcohol. El procedimiento 2 se desarrolló luego de estudiar el error del procedimiento 1, que como se verá es grande. Se hacen los cálculos en base al volumen medido por desplazamiento con alcohol, porque como se verá, en este trabajo se concluye que es mejor determinar el volumen aparente de esa manera.

Se verá adelante que el procedimiento 2 es mejor al 1, aunque no completamente satisfactorio.

3.2.3 Procedimientos Estadísticos

La base del análisis estadístico, es que el muestreo a partir del que se obtienen los datos se efectúe al azar; de otra forma, las inferencias estadísticas que se hagan a partir de los datos no tendrán validez. El muestreo en este trabajo no se realizó al azar, sino en forma sistemática siguiendo un reticulado. Sin embargo, si se demuestra que no existe una variación sistemática de las propiedades medidas en las direcciones del reticulado, se puede asumir que el muestreo se realizó al azar. Para este fin, se probó por prueba F si la variación entre filas o columnas del reticulado de muestreo era significativamente mayor a la variación dentro de filas o de columnas (Fielding Reed y Rigney, 1947). En el test se utilizaron sólo los valores de densidad aparente. Los valores de macroporosidad no se tomaron en cuenta

porque, como se verá, aún el mejor procedimiento de determinación produce un error grande. En cambio, los valores de microporosidad no se consideraron por su escasa variación. No se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre la variancia de las filas comparada con la variancia dentro de filas y la variancia de las columnas comparada con la variancia dentro de las columnas. Se puede concluir que no existe una variación sistematizada en ninguna de las direcciones del reticulado de muestreo, y por lo tanto, se puede asumir que el muestreo se realizó al azar.

Se asumió que el valor de una determinación responde al modelo lineal al azar:

$$y_{ij} = u + p_i + e_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, 12; j = 1, \dots, 6 \text{ ó } 12)$$

En el modelo, y_{ij} es la determinación considerada en la j -ésima muestra del punto i ; u es la media general para la propiedad medida; p_i es la desviación producida por el punto i ; y e_{ij} es la desviación que produce el método en la j -ésima muestra del punto i . En esto último, se asume que toda la variación que se determine dentro de un punto, se debe a error de medida, cosa que no es cierta, puesto que debe haber una "microvariación" natural en las propiedades medidas dentro de un punto de muestreo (1 m^2). Pero ocurre que no hay forma de determinar que parte de la microvariación es natural, y que parte se debe a error de medida, porque las medidas no se pueden repetir en una misma muestra. Por lo tanto, se adjudica al método más error del que realmente produce.

Para tener una medida de la relación entre la variación dentro de puntos y la variación entre punto, se realizó un análisis de variancia para la determinación de cada propiedad a través de cada uno de

los procedimientos descriptos anteriormente. Las variancias entre puntos y dentro de puntos se compararon por prueba: F. La F calculada fue:

$$F \text{ (calculada)} = \frac{\hat{\sigma}^2 \text{ entre puntos}}{\hat{\sigma}^2 \text{ dentro de puntos}}$$

Se probó la hipótesis nula de que ambas variancias son iguales. Si se rechaza la hipótesis nula es porque la variancia dentro de puntos es significativamente menor a la variancia entre puntos al nivel de significación elegido. Para visualizar mejor la relación entre ambas variancias, se determinó en cada caso el "coeficiente de correlación" inter-clases, que es el siguiente:

$$r = \frac{\hat{\sigma}^2 \text{ entre puntos}}{\hat{\sigma}^2 \text{ entre puntos} + \hat{\sigma}^2 \text{ dentro de puntos}}$$

En la medida en que este coeficiente se aproxime a 1, estará indicando que $\hat{\sigma}^2$ dentro de puntos no tiene importancia frente a $\hat{\sigma}^2$ entre puntos.

También, en cada análisis de variancia se determinaron los coeficientes de variación ($s/\bar{x} \cdot 100$) entre puntos y dentro de puntos. El coeficiente de variación, indica cual es la desviación de las determinaciones, expresadas en porcentaje del promedio (Kempthorne y Allmaras, 1965).

Debido a que no se observaron diferencias importantes entre los promedios de las determinaciones hechas en los grupos de muestras A y B, cuando en todos los casos se utilizó el volumen aparente calculado, se utilizaron sólo los valores de las muestras del grupo A para estudiar si existían diferencias entre usar el volumen aparente calculado o el medido con alcohol, en los cálculos de las propiedades medidas. Además se observó que consistentemente los valores de volumen aparente medidos en alcohol, fueron mayores que los calculados, hecho que se discute más adelante. De manera que se probó por prueba t, si los valores de densidad aparente, microporosidad y macro

porosidad (excepto los calculados por el procedimiento 2), eran mayores utilizando el volumen calculado que el medido, contra la hipótesis nula de que eran iguales.

Se probó por prueba t , si existían diferencias en ~~en~~ densidad aparente y microporosidad, usando en los cálculos el volumen medido en alcohol o el volumen que toma el muestreador; se estableció como hipótesis nula que no había diferencias.

Se determinó el número de muestras a tomar para obtener una serie de errores aceptados en las determinaciones con una serie de probabilidades de cometerlos. Para esto se utilizó la fórmula:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot S^2}{d^2}$$

donde n es el número de muestras, S^2 la estimación de la variancia que se obtuvo en cada caso, y t_{α} es el valor t de tablas para los grados de libertad de S^2 y una probabilidad $1 - \alpha$ de que el valor obtenido como promedio de las n muestras no difiera del valor verdadero en una magnitud superior a d , que es el valor absoluto del error o desviación aceptada (Petersen y Calvin, 1965).

Por último, se determinaron los coeficientes de correlación simples entre el contenido de materia orgánica en cada punto y los promedios de la densidad aparente calculada sobre volumen medido en alcohol, y macroporosidad calculada por el procedimiento 2.

RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación, en la Tabla 1, se exponen los datos obtenidos de volumen aparente, densidad aparente, porosidad total, microporosidad, por todos los procedimientos explicados en el capítulo anterior, para cada punto. Asimismo figuran los datos de densidad real, contenido de materia orgánica y análisis mecánico.

T A B L A I

PUNTO 1

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1	Proc. 2	
1 G. A	294,2	286,9	1,3686	1,4036	46,08	44,89	41,2	42,31	2,58	2,69	4,88
2 G. A	300,3	293,3	1,3604	1,3931	46,46	45,28	41,78	42,78	2,53	2,59	4,68
3 G. A	294,6	296,922	1,3581	1,3475	46,46	46,86	43,31	42,97	4,21	4,18	3,15
4 G. A	300,2	294,0	1,3533	1,3819	46,86	45,89	43,00	43,91	1,87	1,90	3,86
5 G. A	297,5	295,1	1,3844	1,3957	45,67	45,28	41,60	41,95	3,29	3,32	4,07
6 G. A	301,68	294,2	1,3995	1,4350	44,89	43,71	40,73	41,77	1,92	1,97	4,16
1 G. B		289,3		1,4085		44,49		44,76			1,66
2 G. B		289,1		1,3708		46,87		43,99			2,25
3 G. B		293,0		1,3767		45,67		43,95			2,08
4 G. B		289,2		1,3717		46,07		43,56			2,666
5 G. B		292,6		1,3998		44,894		42,92			2,19
6 G. B		295,3		1,4341		43,71		41,85			1,52
X			1,3707	1,3995			41,941	43,03	2,73	2,42	4,13

Densidad real: 2.54
o/o de materia orgánica: 3.19

o/o de arcilla: 25.5
o/o de arena: 12.8

o/o de limo: 61.7

a: Volumen medido con alcohol
b: Volumen calculado

PUNTO 2

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
									Proc.1	Proc.2	
1 G. A	301,6	286,9	1,3949	1,4663	45,28	42,13	39,02	41,02	1,19	1,25	6,26
2 G. A	308,9	302,2	1,3409	1,3706	47,25	46,06	41,69	42,62	3,33	3,41	5,56
3 G. A	294,8	281,2	1,3484	1,4135	46,86	44,40	41,01	42,99	1,29	1,35	5,85
4 G. A.	301,7	292,0	1,3421	1,3866	47,25	45,28	41,79	43,18	2,15	2,23	5,46
5 G. A	300,1	289,8	1,3659	1,4144	46,46	44,49	41,38	42,85	1,40	1,45	5,08
6 G. A	302,3	290,6	1,3404	1,3943	47,25	45,28	41,34	43,01	2,02	2,10	5,91
1 G. B		293,2		1,4362		43,31		41,03		2,42	
2 G. B		297,7		1,4098		44,49		42,08		2,42	
3 G. B		293,5		1,3584		46,46		44,15		2,38	
4 G. B		288,2		1,4011		44,88		43,09		1,73	
5 G. B		296,7		1,3720		46,06		44,05		1,92	
6 G. B		293,8		1,4217		44,10		41,38		2,65	
$\bar{X}$			1,3554	1,4033			41,04	42,62	1,90	2,11	5,69

Densidad Real: 2,54

o/o de materia orgánica: 2,57

o/o de arcilla: 21,5

o/o de arena: 13,6

o/o de limo: 64,9

a: Volumen medido con alcohol

b: Volumen calculado

PUNTO 3

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
									Proc.1	Proc.2	
1 G. A	291,9	291,5	1,4508	1,4528	42,92	42,92	39,87	39,93	2,88	2,88	3,05
2 G. A	306,3	290,7	1,3216	1,3925	48,04	45,28	39,92	42,07	2,94	3,09	8,12
3 G. A	301,4	295,7	1,4356	1,4633	43,71	42,52	34,90	35,57	6,70	6,83	8,81
4 G. A	300,1	295,9	1,4255	1,4457	44,10	42,92	38,35	38,89	4,13	4,19	5,75
5 G. A	294,7	285,4	1,4004	1,4460	44,89	42,92	39,66	40,96	2,03	2,10	5,23
6 G. A	295,7	292,6	1,4312	1,4463	43,71	42,92	39,83	40,25	2,77	2,80	3,88
1 G. B		292,3		1,4379		43,31		41,80		1,57	
2 G. B		283,7		1,4324		43,71		41,98		1,62	
3 G. B		289,5		1,4290		43,71		42,41		1,31	
4 G. B		286,7		1,4202		44,10		43,21		0,87	
5 G. B		292,4		1,4237		44,10		42,64		1,30	
6 G. B		303,0		1,4095		44,49		41,88		2,64	
$\bar{X}$			1,4180	1,4333			38,75	40,97	3,57	2,60	5,81

Densidad Real: 2,54

o/o de materia orgánica: 2,64

o/o de arcilla: 21,7

o/o de arena: 16,1

o/o de limo: 62,2

a: Volumen medido con alcohol

b: Volumen calculado

PUNTO 4

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1 a	Proc. 2 b	
1 G. A	298,8	288,4	1,2942	1,3408	49,61	47,66	41,09	42,57	4,88	5,6	8,52
2 G. A	308,1	295,4	1,3015	1,3574	49,22	46,88	41,05	42,82	4,00	4,16	8,17
3 G. A	304,0	302,6	1,4345	1,4411	44,15	43,75	39,57	39,75	3,95	4,00	4,58
4 G. A	301,4	294,9	1,3122	1,3411	48,83	47,66	40,24	41,13	6,37	6,51	8,59
5 G. A	298,1	288,6	1,3653	1,4102	46,49	44,93	40,45	41,78	3,05	3,15	6,04
6 G. A	288,0	283,2	1,3608	1,3838	46,88	46,10	41,77	42,47	3,44	3,49	5,11
1 G. B		287,3		1,3665		46,49		46,45		0,21	
2 G. B		291,4		1,4571		42,97		42,03		1,06	
3 G. B		294,1		1,3750		46,49		43,79		2,62	
4 G. B		284,0		1,3753		46,10		43,41		2,89	
5 G. B		289,0		1,4190		44,54		43,18		1,42	
6 G. B		289,2		1,3492		47,27		44,39		2,90	
$\bar{X}$			1,3447	1,3850			40,69	42,84	4,28	3,17	6,83

Densidad real: 2,56

o/o materia orgánica: 3,05

o/o arcilla: 22,9

o/o arena: 15,7

o/o de limo: 61,4

a: Volumen medido con alcohol

b: Volumen calculado

PUNTO 5

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1 a	Proc. 2 b	
1 G. A	299,12	287,3	1,2624	1,3143	50,59	41,63	43,42	45,21	3,11	3,24	7,17
2 G. A	292,52	277,2	1,3107	1,3831	48,63	45,89	41,71	44,01	1,67	1,77	6,92
3 G. A	300,84	288,4	1,2666	1,3211	50,20	48,24	43,78	45,66	2,43	2,53	6,42
4 G. A	295,46	290,5	1,2304	1,2516	51,77	50,98	45,05	45,82	5,01	5,09	6,72
5 G. A	300,10	289,9	1,2999	1,3456	49,02	47,06	43,58	45,12	2,03	2,10	5,44
6 G. A	297,78	282,1	1,2928	1,3648	49,42	46,67	40,73	42,99	3,20	3,47	8,69
1 G. B		280,8		1,3280		47,84		45,37		2,56	
2 G. B		289,1		1,3110		48,63		47,04		1,56	
3 G. B		283,9		1,3114		48,63		46,42		2,15	
4 G. B		293,3		1,3648		46,67		42,99		3,48	
5 G. B		291,7		1,3418		47,45		44,42		2,95	
6 G. B		291,6		1,3272		47,84		45,37		2,57	
$\bar{X}$			1,2771	1,3292			43,04	45,03	2,92	2,79	6,89

Densidad real: 2,55

o/o materia orgánica: 3,40

o/o de arcilla: 25,9

o/o de arena: 13,8

o/o de limo: 60,3

a: Volumen medido con alcohol

b: Volumen calculado

PUNTO 6*

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1	Proc. 2	
1 G. A	304,26	296,6	1,3546	1,3897	46,86	45,49	41,12	42,18	3,25	3,34	5,74
2 G. A	297,78	285,7	1,3294	1,3857	47,84	45,49	40,83	42,56	3,00	3,11	7,01
3 G. A	296,31	289,8	1,2852	1,3140	49,41	48,63	41,54	42,48	5,87	6,00	7,87
4 G. A	293,50	285,0	1,3226	1,3621	48,24	46,67	42,76	44,05	2,49	2,56	5,48
5 G. A	297,41	282,0	1,2976	1,3684	49,02	46,07	41,73	44,01	2,22	2,34	7,29
6 G. A	297,05	285,3	1,3114	1,3652	48,63	46,07	42,48	44,23	2,15	2,24	6,15
1 G. B		290,9		1,3620		46,67		42,87		3,71	
2 G. B		292,1		1,3755		45,89		42,48		3,56	
3 G. B		275,1		1,3391		47,45		44,09		3,38	
4 G. B		284,1		1,3858		45,49		40,83		4,82	
5 G. B		291,0		1,3598		46,67		44,09		2,58	
6 G. B		279,0		1,3670		46,07		44,62		1,76	
X			1,31681	1,3658			41,74	43,21	3,16	3,28	6,59

Densidad real: 2.55 o/o de arcilla: 23.2 o/o de limo: 61.8 a: Volumen medido con alcohol
 o/o de materia orgánica: 2.86 o/o de arena: 15.0 b: Volumen calculado

PUNTO 7

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1	Proc. 2	
1 G. A	302,43	290,5	1,2991	1,3525	49,02	40,86	42,65	44,41	2,45	2,55	6,37
2 G. A	295,95	291,5	1,2372	1,2559	51,37	50,59	43,96	44,53	6,01	6,11	7,41
3 G. A	297,41	281,4	1,2892	1,3625	49,42	46,67	41,22	43,57	2,86	3,02	8,20
4 G. A	298,39	299,2	1,2476	1,2443	50,98	51,37	42,63	42,51	8,71	8,69	8,35
5 G. A	297,41	284,7	1,2925	1,3502	49,42	46,86	42,37	44,26	2,69	2,81	7,05
6 G. A	299,00	287,5	1,2538	1,3040	50,98	49,02	41,34	42,99	5,65	5,88	9,64
1 G. B		279,0		1,3287		47,84		46,41		1,47	
2 G. B		281,8		1,3091		48,63		45,07		3,58	
3 G. B		294,1		1,4070		44,89		43,35		1,46	
4 G. B		285,2		1,3741		46,07		44,67		1,44	
5 G. B		297,4		1,3026		49,02		45,96		2,96	
6 G. B		288,6		1,3721		46,07		44,21		2,01	
X			1,2699	1,3292			42,36	44,34	4,73	3,50	7,84

Densidad real: 2.55 o/o de arcilla: 22.3 o/o de limo: 62.8 a: Volumen medido con alcohol
 o/o de materia orgánica: 25.3 o/o de arena: 14.9 b: Volumen calculado

PUNTO 8

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1	b	Proc. 2
1 G. A	300,59	295,9	1,2934	1,3139	49,41	48,63	41,62	42,28	6,09	6,18	7,79
2 G. A	296,92	288,9	1,3769	1,4150	45,88	44,71	41,49	42,64	1,82	1,87	4,39
3 G. A	296,68	290,0	1,3411	1,3721	47,45	46,27	42,40	43,38	2,76	2,83	5,05
4 G. A	293,38	286,3	1,3650	1,3989	46,67	45,10	42,03	43,07	2,05	2,10	4,64
5 G. A	297,78	288,9	1,3848	1,4275	45,88	43,92	40,63	41,88	2,08	2,15	5,25
6 G. A	292,65	283,1	1,3927	1,4394	45,49	43,58	40,32	41,68	1,81	1,87	5,17
1 G. B		281,9		1,4367		43,58		41,82		1,84	
2 G. B		285,1		1,3848		45,88		43,81		1,89	
3 G. B		284,2		1,4113		44,71		42,22		2,32	
4 G. B		268,6		1,3399		47,45		44,68		2,79	
5 G. B		285,9		1,4571		42,75		41,83		1,01	
6 G. B		293,8		1,4591		42,75		41,20		1,50	
$\bar{X}$			1,3590	1,4042			41,41	42,55	2,77	2,36	5,38

Densidad real: 2,55

o/o de arcilla: 22,5

o/o de limo: 62,2

a: Volumen medido con alcohol

o/o de materia orgánica: 2,79

o/o de arena: 15,3

b: Volumen calculado

PUNTO 9

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1	b	Proc. 2
1 G. A	292,76	280,8	1,2623	1,3162	50,20	47,83	42,46	41,27	3,55	3,70	7,74
2 G. A	296,43	290,1	1,2827	1,3106	49,41	48,20	44,53	45,50	2,63	2,69	4,88
3 G. A	290,32	278,1	1,2790	1,3351	49,41	47,23	42,95	44,84	2,31	2,41	6,46
4 G. A	297,90	293,4	1,2491	1,2682	50,59	49,87	45,95	46,66	3,16	3,20	4,64
5 G. A	295,333	288,7	1,2116	1,2393	52,17	51,01	43,54	44,54	6,33	6,48	8,63
6 G. A	296,92	294,4	1,2765	1,2874	49,41	49,12	44,29	44,67	4,41	4,45	5,12
1 G. B		283,7		1,3454		46,82		45,79		1,02	
2 G. B		290,7		1,3034		48,48		47,02		1,444	
3 G. B		283,9		1,3036		48,47		46,50		1,97	
4 G. B		295,6		1,3637		46,10		42,59		3,52	
5 G. B		291,8		1,3201		47,82		47,02		0,82	
6 G. B		288,4		1,3148		48,03		47,40		0,62	
$\bar{X}$			1,2602	1,3092			43,95	45,57	3,73	2,69	6,24

Densidad real: 2,53

o/o de arcilla: 26,01

o/o de limo: 59,4

a: Volumen medido con alcohol

o/o de materia orgánica: 3,62

o/o de arena: 14,5

b: Volumen calculado

PUNTO 10

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1 a	Proc. 2 b	
1 G A	292,15	286,9	1,3827	1,4127	45,56	44,38	41,04	41,93	2,40	2,45	4,52
2 G A	299,36	291,8	1,3714	1,4071	46,01	44,60	41,49	42,56	2,00	2,06	4,52
3 G A	300,59	292,5	1,3566	1,3942	46,59	45,11	41,15	42,29	2,76	2,84	5,44
4 G A	294,60	287,9	1,3591	1,3908	46,49	45,25	42,34	43,85	1,39	1,42	3,65
5 G A	296,80	285,6	1,3369	1,3894	47,37	45,30	42,18	43,84	1,41	1,47	5,19
6 G A	294,60	284,3	1,3466	1,3954	46,98	45,07	41,38	42,88	2,10	2,18	5,60
1 G B		296,6		1,3702		46,06		42,58		3,37	
2 G B		293,9		1,4103		44,47		42,63		1,84	
3 G B		300,5		1,3970		45,00		42,20		2,80	
4 G B		279,0		1,3918		45,21		43,91		1,29	
5 G B		286,0		1,4073		44,59		42,45		2,13	
6 G B		283,1		1,3734		45,43		43,91		2,01	
X			1,3589	1,3950			41,68	42,93	2,01	2,15	4,82

Densidad real: 2.54

o/o de arcilla: 22.09

o/o de limo: 61.4

a: Volumen medido con alcohol

o/o de materia orgánica: 2.86

o/o de arena: 15,7

b: Volumen calculado

PUNTO 11

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1 a	Proc. 2 b	
1 G. A	304,25	290,4	1,3501	1,4143	47,26	44,76	40,36	42,29	2,37	2,48	6,90
1 G. A	302,54	286,7	1,3078	1,3798	48,93	46,10	41,75	44,05	1,95	2,06	7,18
3 G. A	303,15	287,8	1,3052	1,3746	49,02	46,31	41,86	44,09	2,111	2,22	7,16
4 G A	292,88	280,7	1,2625	1,3174	50,68	48,54	41,04	42,82	5,50	5,74	9,64
5 G A	302,42	287,1	1,3479	1,4197	47,35	44,54	40,04	42,18	2,25	2,37	7,31
6 G A	302,66	286,4	1,3152	1,3900	48,68	45,72	40,94	43,26	2,31	2,44	7,69
1 G B		281,0	1,4566	1,4566		43,10		42,28		0,82	
2 G B		290,7		1,3763		46,24		41,25		4,99	
3 G B		282,0		1,3656		46,66		44,29		2,38	
4 G B		277,6		1,3689		46,53		43,48		3,06	
5 G B		279,1		1,3873		45,81		44,07		1,76	
6 G B		285,2		1,4043		45,15		43,93		1,23	
X			1,3148	1,3883			41,00	43,17	2,75	2,63	7,65

Densidad real: 2.56

o/o de arcilla: 22.4

o/o de limo: 60.6

a: Volumen medido con alcohol

o/o de materia orgánica: 2.69

o/o de arena: 17.0

b: Volumen calculado

PUNTO 12

MUESTRA	Volumen Aparente		Densidad Aparente		Porcentaje Total		Microporosidad o/o		Macroporosidad o/o		
	a	b	a	b	a	b	a	b	Proc. 1	Proc. 2	
1 G. A	298,14	290,0	1,3277	1,3648	47,73	46,27	41,96	43,14	3,05	3,14	5,77
2 G. A	291,66	286,6	1,2787	1,3015	49,66	48,76	42,24	42,99	5,69	5,79	7,42
3 G. A	297,90	286,9	1,3377	1,3890	47,34	45,32	42,50	44,13	1,14	1,18	4,84
4 G. A	306,09	301,5	1,3414	1,3619	47,19	46,38	40,97	41,59	4,74	4,31	6,22
5 G. A	289,83	288,8	1,3668	1,3715	46,19	46,00	42,99	43,14	2,86	2,87	3,20
6 G. A	298,14	293,2	1,3781	1,4011	45,75	44,84	41,39	42,09	2,72	2,76	4,36
1 G. B		286,2		1,3836		45,53		44,06		1,47	
2 G. B		296,3		1,3230		47,91		44,48		3,44	
3 G. B		295,1		1,3426		47,14		44,36		2,78	
4 G. B		286,6		1,3252		47,80		44,66		3,14	
5 G. B		295,7		1,3020		48,74		44,67		4,06	
6 G. B		287,4		1,3897		45,29		43,04		2,26	
X			1,3384	1,3533			42,01	43,53	3,37	3,14	5,30

Densidad Real: 2,54

o/o de arcilla: 21,8

o/o de limo: 62,4

a: Volumen medido con alcohol

o/o de materia orgánica 2,65

o/o de arena: 15,8

b: Volumen calculado

gdf/

4.1 Comparación entre Volumen Medido con Alcohol y Volumen calculado

Se encontraron las siguientes diferencias promedio entre usar en los cálculos el volumen aparente medido y el calculado:

- en densidad aparente, 0.041 gr/cm^3
- en macroporosidad (procedimiento 1), $0,093 \%$
- en microporosidad, $1,239 \%$

En todos los casos la diferencia es a favor de usar volumen calculado. También en todos los casos hay diferencia significativa ($P < 0,01$). Como se observa, a pesar de que estadísticamente las diferencias son significativas, sólo se puede considerar muy grande la que se da en la densidad aparente. Estos resultados se deben a que consistentemente el volumen calculado es menor ($9,14 \text{ cm}^3$ en promedio) al volumen medido por desplazamiento de alcohol. Los autores, piensan que las muestras no se saturan completamente en el laboratorio, quedando aire atrapado en su interior. El cálculo del volumen de las muestras, como se vio en el capítulo anterior, es la suma de su volumen poroso y su volumen de sólidos. Debido a que el volumen poroso se calcula como la pérdida volumétrica de agua, desde saturación hasta 105°C , queda fuera del cálculo el volumen de aire atrapado. La mayor parte del aire atrapado queda en los macroporos, ya que en las muestras del grupo A, la macroporosidad calculada por el procedimiento 1 sobre volumen medido con alcohol, es consistentemente menor que la calculada por el procedimiento 2, y en promedio, la diferencia es prácticamente la que existe entre el volumen medido con alcohol y el calculado. El valor promedio de macroporosidad obtenido por el procedimiento 1 sobre volumen medido con alcohol es $3,16\%$, mientras el obtenido por el procedimiento 2 es $6,10\%$. Hay en promedio un $2,84\%$ de macroporos no detectados por la diferencia de contenido volumétrico de agua entre saturación y capacidad de campo. Este valor incluye todo el aire atrapado, y el error que origine el atribuirlo totalmente a los macroporos dependerá de la magnitud de aire atrapado

que pueda quedar en los microporos.

De lo anterior, debe concluirse que es mejor determinar el volumen por desplazamiento de alcohol, que calcularlo. Y además, que el procedimiento 2 utilizado para determinar macroporosidad, mide una porción de ésta no detectada por el procedimiento 1.

4.2 Comparación de la Variación Introducida por el Método, Frente a la Macrovariación

Los análisis de variancia de las determinaciones de densidad aparente se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1

ANALISIS DE VARIANCIA DE LAS DETERMINACIONES DE DENSIDAD APARENTE

Fuente de Variación	Volumen medido por desplazamiento de alcohol			Volumen calculado		
	G.de L.	S.C.	C.M.	G.de L.	S.C.	C.M.
Total	71	0,1979		743	0,3572	
Entre Puntos	11	0,1619	0,01500	11	0,1814	0,01649
Dentro de Puntos	60	0,0360	0,00060	132	0,1758	0,00133
$F_{\text{calcul.}} = 25 > F_{0,01}$ de tablas				$F_{\text{calcul.}} = 12,28 > F_{0,01}$ de tablas		
r interclases = 0,9959				r interclases = 0,9253		
media general = 1,33				media general = 1,37		
<u>coeficientes de variación</u>				<u>coeficientes de variación:</u>		
Entre puntos = 9,2 % ($\pm 0,122$)				Entre puntos = 9,37 % ($\pm 0,128$)		
D. de puntos = 1,84 % ($\pm 0,0194$)				D. de puntos = 2,66 % ($\pm 0,036$)		

Se observa que ambos procedimientos introducen aproximadamente la misma variación, aunque medir con alcohol es levemente más preciso. La variación introducida por el método en ambos casos, es insignificante frente a la macro variación.

Los análisis de variancia de las determinaciones de microporosidad se presentan en el cuadro 2.

Nuevamente, hay poca diferencia entre ambos procedimientos en cuanto a la variación que introducen. Esta es insignificante en ambos casos frente a la macrovariación.

Los análisis de variancia de macroporosidad por el procedimiento 1 se ven en el cuadro 3.

Cuadro 2

ANALISIS DE VARIANCA DE LAS DETERMINACIONES DE MICROPOROSIDAD

Fuente de Variación	Volumen medido por desplazamiento de alcohol.			Volumen Calculado		
	G. de L.	S.C.	C.M.	G.de L.	S.C.	C.M.
Total	71	180.5822		143	430,5507	
Entre puntos	11	108,7363	9,8851	11	194,7736	17,7067
Dentro de puntos	60	71,8459	1,1974	132	235,7771	1,7862
=====						
F _{calc.} = 8,26 > F _{0,01} de tablas				F _{calc.} = 9,91 > F _{0,01} de tablas		
r interclases = 0,8919				r intercambiabiles = 0,9084		
media general = 41,6342%				media general = 43,3158%		
<u>Coefficientes de Variación</u>				<u>Coefficientes de Variación</u>		
Entre Puntos: 7,55 % (+ 3,14%)				Entre Puntos: 9,71% (+ 4,206%)		
D. de Puntos: 2,63 % (+ 1,095%)				D. de Puntos: 3,08% (+ 1,334%)		

Cuadro 3

ANALISIS DE VARIANCIA DE LAS DETERMINACIONES DE MACROPOROSIDAD POR EL
PROCEDIMIENTO 1

Fuente de Variación	Volumen medido por el desplazamiento de alcohol.			Volumen Calculado		
	G.de L.	S.C.	C.M.	G.de L	S.C.	C.M.
Total	71	171,1526		143	279,4730	
Entre Puntos	11	46,4340	4,2213	11	26,8549	2,4414
Dentro de Puntos	60	124,7186	2,0786	132	252,6181	1,9138
=====						
$F_{\text{calc.}} = 2,03 > F_{0,05}^{\text{de tablas}}$ $r_{\text{interclases}} = 0,6701$ media general = 3,16% <u>Coefficiente de Variación</u> Entre Puntos = 65,02% (+ 2,055%) D. de Puntos = 45,62% (+ 1,442%)				$F_{\text{calc.}} = 1,276 < F_{0,05}^{\text{de tablas}}$ $r_{\text{interclases}} = 0,5605$ media general = 3,08% <u>Coefficiente de Variación</u> Entre Puntos = 50,66% (+ 1,560%) D. de Puntos = 44,86% (+ 1,382%)		

La variación que introduce medir el volumen con alcohol frente a la macrovariación, es menor que la que introduce el volumen calculado. Sin embargo, no se debe a que la variación dentro de puntos sea distinta en ambos casos, sino a que la variación entre puntos fue mayor cuando el volumen se midió con alcohol. Sólo en el caso de la medida de volumen con alcohol la variación entre puntos es significativamente mayor ($P < 0,05$). Pero si se tiene en cuenta lo dicho anteriormente, el resultado es irrelevante. A grandes rasgos, el panorama es el mismo para ambos procedimientos: la variación introducida por el método de medida es muy grande (ver coeficientes de variación dentro de puntos en el cuadro 3), y además la macroporosidad es la propiedad más variable (ver coeficientes de variación entre puntos en el cuadro 3).

A causa de las conclusiones que se arribó en 4.1 y de los resultados anteriores, se calculó la macroporosidad por el procedimiento 2. El análisis de variancia de los resultados de este procedimiento se presenta en el cuadro 4.

Cuadro 4

ANALISIS DE VARIANCIA DE LAS DETERMINACIONES DE MACROPOROSIDAD POR EL
PROCEDIMIENTO 2

Fuente de Variación	G. de L.	S.C.	C.M.
Total	71	184,5601	
Entre Puntos	11	82,5169	7,5015
Dentro de Puntos	60	102,0432	1,7007

$$F_{\text{calc.}} = 4,41 > F_{0,01} \text{ de tablas}$$

$$r_{\text{interclases}} = 0,8152$$

$$\text{media general} = 6,10\%$$

Coefficientes de variación:

$$\text{Entre puntos} = 44,91\% (\pm 2,74\%)$$

$$\text{Dentro de puntos} = 21,38\% (\pm 1,30\%)$$

La variación introducida por el procedimiento 2 no es significativa, frente a la variación entre puntos. El coeficiente de variación dentro de puntos es la mitad de los que se obtenían con el procedimiento 1. De todas maneras, son los coeficientes de variación más altos, comparados con los de las determinaciones de densidad aparente y microporosidad, y ésto se debe, como ya se dijo, a que es la propiedad más variable de las tres que se estudian en este trabajo.

Se concluye que el método no provoca demasiado error en las determinaciones de densidad aparente y microporosidad. Para la determinación de macroporosidad, el procedimiento 2 es el más preciso, aunque la variación que intrduce es bastante grande.

La variación que existe en la chacra estudiada (macrovariación) es muy grande en macroporosidad, en cambio es pequeña en densidad aparente y microporosidad.

4.3 Comparación entre usar el volumen que toma el muestreador o el Volumen medido.

No se encontraron diferencias significativas en densidad aparente y microporosidad, cuando se usaron en los cálculos el volumen medido en alcohol o el tomado por el muestreador. Entonces, no es necesario medir el volumen en alcohol si el suelo está a capacidad de campo, que, como se vió es lo que proponen De Boodt (1960), De Boodt (1965) y De Leenheer (1967 a). Pero además, en el suelo utilizado no existe expansión al saturar las muestras, si las mismas se toman con una humedad alrededor del 85,8% del contenido a capacidad de campo, o más alta.

4.4 Número de Puntos y Muestras por Punto que se deben tomar

Para cada propiedad, determinada por los procedimientos que resultaron mejores de acuerdo a las conclusiones a que se arribó en los items 4.1 y 4.2, se calcularon el número de puntos y de muestras por punto que se deben tomar, para una serie de combinaciones de errores aceptados y probabilidades de obtenerlos. Los resultados aparecen en los cuadros 5 y 6.

Quadro 5

NUMERO DE MUESTRAS POR PUNTO

Para densidad aparente calculada sobre volumen medido en alcohol
($s^2 = 0.0006$):

Error aceptado, d

Probabilidad.	t de tablas 60 G. de L.	$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$
99%	$t_{0,01} = 2,660$	170	42	11	5	3
95%	$t_{0,05} = 2,000$	96	24	6	3	2
90%	$t_{0,1} = 1,671$	67	17	4	2	1
80%	$t_{0,2} = 1,296$	40	10	3	1	0,63

Para macroporosidad calculada por el procedimiento 2

($s^2 = 1,7007$):

Error aceptado, d

Probabilidad	t de tablas 60 G. de L.	$\pm 0,5\%$	$\pm 1,0\%$	$\pm 2,0\%$	$\pm 3,0\%$	$\pm 4,0\%$
99%	$t_{0,01} = 2,660$	48	12	3	1	0,75
95%	$t_{0,05} = 2,000$	27	7	2	0,76	0,42
90%	$t_{0,1} = 1,671$	17	5	1	0,53	0,30
80%	$t_{0,2} = 1,296$	11	3	0,71	0,32	0,18

Para microporosidad calculada como porcentaje del volumen medido en alcohol ($s^2 = 1,1974$):

Probabi lidad.	t de tablas 60 G. de L.	Error aceptado, d				
		$\pm 1,0\%$	$\pm 2,0\%$	$\pm 3,0\%$	$\pm 4,0\%$	$\pm 5,0\%$
99%	$t_{0,01} = 2,660$	8	2	0,94	0,53	0,34
95%	$t_{0,05} = 2,000$	5	1	0,53	0,30	0,19
90%	$t_{0,1} = 1,671$	3	0,84	0,37	0,21	0,13
80%	$t_{0,2} = 1,296$	2	0,50	0,22	0,13	0,08

Quadro 6:

NUMERO DE PUNTOS QUE DEBEN MUESTREARSE

Para densidad aparente calculada sobre volumen medido en alcohol ($s^2=0,015$):

Probabi lidad	t de tablas 11 G. de L.	Error aceptado d					
		$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$
99%	$t_{0,01} = 3,106$	5788	1447	362	90	58	14
95%	$t_{0,05} = 2,201$	2907	727	182	45	29	7
90%	$t_{0,1} = 1,796$	1935	484	121	30	19	5
80%	$t_{0,2} = 1,363$	1115	279	70	17	11	3

Para Macroporosidad calculada por el procedimiento 2

($s^2 = 7,5015$):

Error aceptado, d

Probabilidad	t de tablas 11 G. de L.	$\pm 0,5\%$	$\pm 1,0\%$	$\pm 2,0\%$	$\pm 3,0\%$	$\pm 4,0\%$
99%	$t_{0,01} = 3,106$	289	72	18	8	5
95%	$t_{0,05} = 2,201$	145	36	9	4	2
90%	$t_{0,1} = 1,796$	97	24	6	3	2
80%	$t_{0,2} = 1,363$	56	14	3	2	0,87

Para microporosidad calculada como porcentaje del volumen
medido en alcohol ($s^2 = 9,8851$):

Error aceptado, d

Probabilidad	t de tablas 11 G. de L.	$\pm 1,0\%$	$\pm 2,0\%$	$\pm 3,0\%$	$\pm 4,0\%$	$\pm 5,0\%$
99%	$t_{0,01} = 3,106$	95	24	11	6	4
95%	$t_{0,05} = 2,201$	48	12	5	3	2
90%	$t_{0,1} = 1,796$	32	8	4	2	1
80%	$t_{0,2} = 1,363$	18	5	2	1	0,73

La densidad aparente es la propiedad que determina el número de puntos y muestras por punto que se deben tomar. Esto se debe a que es muy pequeño el error que se debe aceptar en la determinación de esta propiedad.

Dada la poca variación que introduce el método, y la variación significativamente mayor que existe entre puntos, los resultados indican que es más

importante muestrear muchos puntos, que tomar muchas muestras por punto.

Con fines de caracterización, parecería suficiente muestrear 15 puntos tomando tres muestras por punto. De esta manera, se obtendrían errores aceptables con una probabilidad de 80% en el peor de los casos (densidad aparente.).

4.5 Correlaciones Simples entre Densidad Aparente y Contenido de Materia Orgánica; y Macroporosidad y Contenido de Materia Orgánica.

Se estudiaron las correlaciones simples existentes entre el contenido de materia orgánica y los promedios de densidad aparente (sobre volumen medido en alcohol), y la macroporosidad (procedimiento 2) de cada punto. No se estudiaron correlaciones de las mismas propiedades con las distintas fracciones granulométricas, porque la textura es prácticamente constante en los doce puntos (ver tabla 1).

Sin embargo, existe variación en el contenido de materia orgánica (C.V. = 39,41%). Los coeficientes de variación de la densidad aparente y la macroporosidad entre puntos, se presentaron en los cuadros 1 y 4 respectivamente.

Se encontró un coeficiente de correlación de $-0,4054$ entre la densidad aparente y el contenido de materia orgánica. Entre el contenido de materia orgánica y macroporosidad el coeficiente de correlación fue $-0,0624$.

El valor de la correlación entre la materia orgánica y la densidad aparente es medio en valor absoluto, a pesar de que la variación en la densidad

aparente es poca (C.V. = 9,2%). La correlación es negativa, lo cual era de esperar.

No hay correlación en la chacra estudiada, entre la materia orgánica y el porcentaje de macroporos. Esto se puede deber a que en el suelo trabajado existen variables que afectan a la macroporosidad más que la variación de la materia orgánica. Además se debe tener en cuenta que el método introduce una variación importante en la determinación de la macroporosidad.

RESUMEN

Se evaluaron estadísticamente varios procedimientos alternativos, de un método para medir densidad aparente, microporosidad y macroporosidad, en muestras importuradas de un volumen de 299 cm^3 saturadas artificialmente en el laboratorio. En todos los procedimientos alternativos, los cálculos se hicieron en base al máximo volumen aparente expandido que alcanzan las muestras. Se encontró que es mejor determinarlo a través del desplazamiento de alcohol que producen las muestras cuando se sumergen en dicho líquido, que calcularlo como la suma del volumen poroso y el volumen de sólidos. Esto se debe a que la medida directa incluye una porción del volumen aparente que el cálculo no detecta.

Se encontró que en el área estudiada, la variación de la densidad aparente y la microporosidad es mayor ($P < 0,01$) que la variación introducida por todos los procedimientos alternativos usados para medirlas. Por lo tanto, el método evaluado tiene precisión satisfactoria para medir estas propiedades. En el caso de la macroporosidad, la variación en el área estudiada, sólo supera ($P < 0,01$) a la introducida por una de los procedimientos alternativos, que determina la macroporosidad como la diferencia entre la porosidad total y la microporosidad. Los resultados que arroja este procedimiento indican que es la propiedad más variable en el área estudiada (C.V. = 44,91%), y que la variación que introduce este procedimiento es alta (C.V. = 21,38%). Por lo tanto, el procedimiento que resultó más preciso para medir macroporosidad, introduce un error demasiado grande como para considerarlo totalmente satisfactorio.

Las determinaciones de densidad real en los 12 puntos, presentan una diferencia de $0,03 \text{ gr/cm}^3$ entre los valores extremos y su media es $2,545 \text{ gr/cm}^3$.

Este valor difiere sustancialmente el valor teórico 2,65, por lo que es necesario medir la densidad ~~directamente~~ para calcular la porosidad total.

No hubieron diferencias significativas entre las determinaciones basadas en el volumen aparente medido y las que se hicieron con el volumen que toma el dispositivo muestreador. Por lo tanto, en el horizonte Ap del suelo estudiado, se puede tomar como el máximo volumen expandido, el que toma dicho dispositivo, si el contenido de humedad está alrededor de 86% del contenido a capacidad de campo o es más alto.

Se calculó el número de puntos y el número de muestras por punto que se deben tomar para una serie de combinaciones de errores aceptados en las determinaciones y probabilidades de obtenerlos. Resultó más importante muestrear muchos puntos que tomar muchas muestras por punto. Con fines de caracterización sería suficiente muestrear 15 puntos y 3 muestras por punto para tener errores aceptables en las medidas con un 30% de probabilidad en el peor de los casos (densidad aparente). En trabajos más precisos, habría que permitirse menos error y aumentar la probabilidad de obtenerlo, lo que significa fundamentalmente muestrear más puntos, y tomar algunas muestras más por punto.

En el área estudiada, se encontró una correlación media negativa ($r = -0,4054$) entre el contenido de materia orgánica y la densidad aparente calculada en base al volumen medido. Sin embargo, no se encontró correlación entre el contenido de materia orgánica y la macroporosidad determinada como la diferencia entre porosidad total y microporosidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren señalar su agradecimiento a las siguientes personas o instituciones:

- A los compañeros docentes de la Cátedra de Edafología Bachs. Juan Carnelli y Daniel Soto por su colaboración en el muestreo.
- A la Ing. Ahr. Solva Rubbo de Del Campo, Funcionario del P.E.L.S., por la realización de los análisis mecánicos.
- Al Instituto de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería y Agrimensura por facilitar los picnómetros para determinar la densidad real.
- A la Cátedra de Biometría de la Facultad de Agronomía por evacuar las consultas sobre análisis estadístico de los datos.
- Al Programa de Estudio y Levantamiento de Suelos por permitir que su Secretaría dactilografiara este trabajo y que se utilizaran sus calculadoras electrónicas.

6. BIBLIOGRAFIA

- Allison, L.E. (1965). Organic Carbon. En "Methods of soil analysis", parte 2, pág. 1367-1378. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Baver, L.D. (1956). Soil Physics. Ed. John Wiley & Sons. New York, London, Sydney.
- Black, C.A. (1967). Soil-plant Relationships. John Wiley & Sons. New York, London, Sydney.
- Blake, G.R. (1965a). Particle Density. En "Methods of soil analysis", parte 1, pág. 371-373. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Blake, G.R. (1965). Bulk Density. En "Methods of soil analysis", parte 1, pág. 374-390. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Bossi, J. (1969). Geología del Uruguay. Segunda edición. Univ. de la Rep., Dep. de Public.
- C. de Inv. Agr. "A. Boerger" (1971). Fertilización de Pasturas. Boletín de divulgación No. 5.
- C.I.D.E. (1967). Los suelos del Uruguay, su Uso y mejoramiento. Ministerio de Ganadería y Agricultura. Montevideo.
- Day, P.R. (1965). Particle Fractionation and Particle-size Analysis. En "Methods of Soil Analysis", parte 1, pág. 545-567. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- De Boodt, M. (1960). Special Report on soil Structure measurements. Trans. 7th International Cong. Soil Sci., Madison, Wis. I: 290-299.
- De Boodt, M. (1965). Soil Physics. International Training Centre for Post-graduate Soil Scientists. Gante, Bélgica.

- De Loonheer, L. (1967a). Considérations critiques sur la valeur des résultats de la détermination de la porosité totale et de la distribution des pores du sol. *Pédologie*. XVII, 2. Bull. de la Soc. Belge de Pédologie.
- De Loonheer, L. (1967b). Variation in time of the soil porosity and pore-size distribution. General picture of a six-year study on a loamy soil. *Pédologie* XVII, 3. Bull. de la Soc. Belge de Pédologie.
- Durán, A. A. Kaplan (1965). Determinación de la densidad aparente, macroporosidad y microporosidad en algunos suelos del Uruguay. Archivo del Dep. de Suelos de la Fac. de Agronomía. Montevideo.
- Durán, A. y E. Marchesi (1969). Los Suelos del Uruguay. Colección "Nuestra Tierra", No. 18.
- Fielding Reed, J. y J.A. Rigney (1947). Soil Sampling from Fields of Uniform and Nonuniform Appearance and Soil Types, Jour. Amer. Soc. of Agron. 39 (1): 26-40.
- Fox, W.E. (1964). A Study of Bulk Density and Water in a Swelling Soil. *Soil Sci.* 98 (5): 307-316.
- Gerard, C.J., W.R. Cowley y G.W. Kunze (1966). Influence of Drying Conditions on Noncapillary Porosity. *Soil Sci.* 102 (1): 59-63.
- Kockstra, A. (1969). Some Physical Characteristics of the Sedimentary Soils around the Morin Lagoon. Morin Lagoon Regional Project, Treinta y Tres (Documento interno).
- Hofstadter, R. (1972). Influencia de la composición mecánica y del contenido de materia orgánica sobre la disponibilidad de agua en los suelos. Univ. de la Rep., Fac. de Agr., Tesis.
- Konthomo, O. y R.R. Allmaras (1965). Errors of Observation. En "Methods of Soil Analysis", parte 1, pág. 1-23. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Labolla, S.J. y G. Alvarez (1969). Humedad disponible y "fácilmente disponible" en algunos suelos del Uruguay. Univ. de la Rep., Fac. de Agr. (repartido mimeografiado).

- Miller, W.F. (1966). Volume Changes in Bulk Density Samples. Soil Sci. 102 (5): 300-304.
- Poterson, R.G. y L.D. Calvin (1965). Sampling. En "Methods of Soil Analysis", parte 1, pág. 54-72. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Prihar, S.S. y K.S. Vorma (1969). A Rapid Method for Direct Determination of Air Porosity on Soil. Soil Sci. 107 (2): 145-147.
- Richards, L.A. (1965). Physiscal Condition of Water in Soil. En "Methods of Soil Analysis", parte 1, pág. 128-151. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron. and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Slatyer, R.O. (1967). Plant-Water Relationships. Academic Press, London and New York.
- Shipp, R.F. y R.P. Matolski (1965). Bulk - Density and Coarse - Fragment determinations on some Pennsylvania Soils. Soil Sci. 99 (6): 392-397.
- Strickling, E. (1965). Relationship of porosity to water stability in Beltsville soil aggregates. Soil Sci. 80 (6): 449-457.
- Vonocil, J.A. (1965). Porosity. En "Methods of Soil Analysis", parte 1, pág. 299 - 314. Ed. C.A. Black y col. Amer. Soc. of Agron, and Amer. Soc. for Test. and Mat.
- Zimmerman, R.P. y L.T. Kardos (1961). Effect of Bulk Density on Root Growth. Soil Sci. 91 (4): 280-288

A handwritten signature in dark ink, appearing to be 'J. A. Vonocil', written over a horizontal line.