

# APLICACION DE LA TECNICA DE POROSIMETRIA POR INTRUSION DE MERCURIO EN EL ESTUDIO DE LA POROSIDAD DE UN CONJUNTO DE SUELOS DEL NW DE ESPAÑA

E. Benito\*, A. Paz\* y R. Pini\*\*

\* *Departamento de Edafología y Química Agrícola. Univ. de Santiago de Compostela. 15706. Santiago de Compostela.*

\*\* *Istituto per la Chimica del Terreno (CNR). 56125 Pisa, Italia.*

## RESUMEN

Se revisan los principios en que se basa la técnica de porosimetría por intrusión de Hg para la evaluación del tamaño de poros del suelo y de desplazamiento con mercurio para la medida de la densidad aparente, describiéndose así mismo el equipo instrumental utilizado.

Se presentan los resultados obtenidos en muestras superficiales y del subsuelo, cuya densidad aparente oscila entre 1.12 y 2.03 g cm<sup>-3</sup> y se discuten la precisión del método y el efecto del tamaño de los agregados.

La duplicación de los análisis muestra que los valores de porosidad diferencial y total son más similares bajo pradera que en suelos de cultivo. Por otra parte, la utilización de agregados de tamaño pequeño permite caracterizar con más precisión el espacio poroso textural en suelos de granulometría arenosa y areno-arcillosa.

Palabras clave: Porosimetría de mercurio. Volumen de poros. Distribución del tamaño de poros. Densidad aparente. Tamaño de agregado. Porosidad textural. Porosidad estructural.

## SUMMARY

### THE USE THE MERCURY POROSIMETER FOR STUDIES OF THE POROSITY IN SOME SOILS OF NW SPAIN

The theoretical background of two techniques, mercury intrusion porosimetry to appraise soil size size and mercury displacement for bulk density measurements are reviewed, and commercial instrumentation is described.

Results from both surface horizon and subsoil samples with bulk densities which vary between 1.12 and 2.03 g cm<sup>-3</sup> are reported the accuracy of the method and effect of aggregate sizes are discussed. Carrying ant the analysis twice shows that differential and values total porosity values are more homogeneous in grassland samples compared with those from cultivated soils.

The use of small size aggregates appears to be a more accurate way to characterize texture porosity in sandy and sandy-clay soils.

Key words: Mercury porosimetry. Pore volume. Pore-size distribution. Bulk density. Aggregates sizes. Texture porosity. Structure porosity.

## INTRODUCCION

La mayor parte de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el suelo dependen del espacio poroso, el cual representa normalmente del 40 al 60% del volumen total del suelo.

El conocimiento del número, dimensión y continuidad de los poros, permite no sólo caracterizar la estructura del suelo sino también los movimientos de agua y aire y en consecuencia la influencia de estos parámetros sobre el crecimiento de las plantas. (Vigna Guidi y Pini, 1988).

Para el estudio de la porosidad de los suelos ha adquirido un gran interés en los últimos 20 años la técnica de la porosimetría por intrusión de Hg, la cual nos permite conocer no sólo el volumen total de poros, sino también su distribución por tamaños en el rango de diámetros 200-0.01  $\mu$ . La validez de la técnica de porosimetría por intrusión de Hg ha sido ampliamente discutida (Lawrence, 1977, 1978; Newman y Thomasson, 1979; Muray y Quirk, 1980, etc.). Los principales inconvenientes se refieren a la técnica de secado de la muestra y a la entrada del Hg en los poros.

Durante el proceso de secado de la muestra se pueden producir alteraciones profundas del sistema poroso, de modo que los datos obtenidos pueden no ser representativos de la porosidad original del suelo. De todas formas, estudios realizados por Lawrence (1977, 1978) establecen que la alteración del sistema poroso consecuencia del secado es mínima en terrenos arenosos y limosos, y únicamente los terrenos

ricos en arcilla pueden plantear algunos problemas. En estos casos debería emplearse la técnica de "secado al punto crítico" (critical point drying) por ser la que causa menos alteraciones en el sistema poroso (Lawrence, 1977; Vigna Guidi y Pini, 1988).

En cuanto a la posibilidad de colapso de los poros durante la entrada del Hg, estudios realizados por Sills *et al.* (1973, 1974), Nagpal *et al.* (1972) y Lawrence *et al.* (1979) concluyen que es difícil que se produzcan daños en la muestra, por lo que consideran que las curvas de distribución de tamaños de poros obtenidas por esta técnica son perfectamente fiables.

En España no existen hasta el momento datos sobre la aplicación a los suelos de la técnica de porosimetría por intrusión de Hg. Por ello, el objetivo de este trabajo ha sido presentar los primeros resultados de la aplicación de esta técnica a un conjunto de suelos del NW de España. Se describen los principios del método, la técnica experimental, la precisión del método y el efecto del tamaño y preparación de la muestra sobre el volumen de mercurio introducido.

### PRINCIPIO DEL METODO

La ecuación utilizada en la porosimetría de mercurio se puede expresar de la forma siguiente:

$$P \cdot r = - 2 \gamma \cos \theta$$

donde P es la presión requerida para forzar la entrada de Hg en los poros

de radio  $r$ , asumiendo que éstos tengan una geometría cilíndrica y  $\gamma$  y  $\theta$  son respectivamente la tensión superficial y el ángulo de contacto del Hg. Estos dos parámetros no tienen un valor constante, ya que  $\theta$  depende de la naturaleza de la muestra y  $\gamma$  varía con la temperatura. Para el ángulo de contacto se han encontrado valores comprendidos entre  $112$  y  $150^\circ$  para diferentes materiales (Lawrence, 1977). En cuanto a  $\gamma$  a  $25^\circ$  su valor es de  $484.2$  dinas  $\text{cm}^{-1}$  mientras que a  $50^\circ$  es de  $472$  dinas  $\text{cm}^{-1}$ .

Rootare en 1968 comprueba que variaciones en el valor de  $\gamma$  no afectan de forma importante a los resultados de porosidad. Sin embargo,  $\theta$  tiene un efecto importante en los tamaños de poros calculados. Sarakhov (1963) observa que una desviación de  $10$  a  $15^\circ$  respecto al valor real (cuando  $\theta = 40^\circ$ ) daba errores en el tamaño de poro de aproximadamente el 20%. Para el porosímetro descrito en este trabajo se han considerado valores medios de  $\theta$   $141.3^\circ$  y  $\gamma$  de  $480$  dinas  $\text{cm}^{-1}$ , de acuerdo con los valores utilizados por otros investigadores en este campo (Lawrence *et al.*, 1979; Churchman y Payne, 1983; Vigna Guidi y Pini, 1988).

### TECNICA EXPERIMENTAL

De los diversos porosímetros presentes en el comercio, la descripción que se da en este trabajo se refiere al porosímetro CARLO ERBA serie 2000, el cual lleva acoplada una unidad de macroporos serie 120. Todas las determinaciones se han realizado en el Istituto per la Chimica del Terreno (CNR) de Pisa (Italia).

La muestra de suelo se introduce en un dilatómetro y se lleva a la unidad de macroporos, donde se realiza el llenado con el Hg, una vez eliminado el aire de la muestra mediante vacío. La unidad de macroporos permite ir aplicando presiones crecientes hasta alcanzarse la presión atmosférica y de esta forma se analizan los poros de diámetro comprendido entre  $100$  y  $3.75 \mu$ . Posteriormente el dilatómetro con la muestra y el Hg se lleva a la unidad 2000 en donde la presión máxima que se alcanza es de  $2000 \text{ Kg cm}^{-2}$  y en consecuencia permite medir los poros comprendidos entre  $15$  y  $0.006 \mu$ .

La progresiva penetración del Hg en los poros de la muestra de suelo se mide eléctricamente mediante un sistema de capacitancia. A medida que aumenta la presión aplicada, el nivel de Hg disminuye y por tanto cambia la capacitancia. Esta variación es procesada electrónicamente por la unidad de control y registrada en el sistema de datos utilizado. Cuando se alcanza la presión máxima, el sistema se para automáticamente y comienza el ciclo de descenso de la presión.

La elaboración de los datos se realiza mediante el programa "Milestone 100". El ordenador almacena los valores de presión y penetración de Hg recogidos en la unidad de macroporos, así como los valores de compresión y penetración de presión y los datos de volumen más la extrusión (histéresis) de la unidad de microporos del porosímetro.

Se obtienen medidas del volumen total de poros, radio del poro, así como la distribución de los poros por tamaños. Además, este programa nos permite la posibilidad de cono-

cer otros parámetros relacionados como son el área superficial específica, la densidad aparente y el porcentaje de porosidad total de la muestra analizada.

Para el cálculo del área superficial específica el programa "Milestone 100" permite utilizar cuatro modelos matemáticos (cilíndrico, cónico, planar y "cuello de botella"), habiéndose empleado en nuestro caso el modelo cilíndrico.

El cálculo de la densidad aparente se efectúa midiendo la masa de Hg desplazada por la muestra de suelo. Se conoce así el volumen de la misma y en consecuencia el valor de la

densidad. La fórmula utilizada sería la siguiente:

$$Dap = 13.6 / (PDH + PDHM + Pm)Pm$$

siendo: Pm el peso de la muestra, PDH el peso del dilatómetro más el Hg, PDHM el peso del dilatómetro más el Hg más la muestra y Dap la densidad aparente en  $g\ cm^{-3}$ .

La porosidad total se calcula:

$$PT = Dap \cdot Vm / 10$$

donde: PT sería la porosidad total (%) y Vm el volumen máximo de poros.

## MATERIAL Y METODOS

Para este estudio se han recogido 12 muestras de suelo procedentes de distintas localidades de la comarca lucense de Terra Cha, 9 de las cuales corresponden a horizontes superficiales, habiéndose tomado de los primeros 20 cm del suelo, y las 3 restantes a horizontes subsuperficiales. Las principales características de los suelos se presentan en la Tabla 1, habiéndose utilizado los 8 primeros para el estudio de la variabilidad

de la técnica de porosimetría por intrusión de Hg aplicada a suelos, y los 7 últimos para analizar la influencia del tamaño y preparación de la muestra en los valores de porosidad.

Los análisis generales de los suelos se realizaron según la metodología propuesta por Guitián y Carballas (1976). Las muestras de Bonxe pradera y cultivo se analizaron en los laboratorios centrales del INRA en Arras (Francia).

## RESULTADOS

### *Precisión del método*

Para analizar la variabilidad de la técnica de porosimetría por intrusión de Hg se han realizado los análisis por duplicado en 8 muestras de suelo. Las determinaciones se llevan a cabo en agregados naturales de 2-3 cm de diámetro, tamaño máximo que permite el dilatómetro utilizado.

En la figura 1 se representa la distribución de tamaños de poros de las muestras analizadas, mediante curvas continuas del volumen acumulado de Hg introducido ( $cm^3\ 100\ g$ ) en función del diámetro de poro ( $\mu$ ). Se aprecia una dependencia entre la fase mayor de entrada de Hg y la granulometría. Así, en los horizon-

TABLA I  
*Características generales de los suelos estudiados.*

Suelos	Clasificación FAO	Horizonte	Uso del suelo	% C	Arena %	Limo %	Arcilla %	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl
BONXE	Cambisol úmbrico	Ap	Pradera	3.78	49.5	32.5	18.0	5.20	4.30
BONXE	Cambisol úmbrico	Ap	Pradera	2.79	51.8	30.8	17.7	5.10	4.20
ARNEIRO	Gleisol úmbrico	Ap	Pradera	3.98	59.4	18.9	21.7	5.17	4.40
ARNEIRO	Gleisol úmbrico	Ap	Cultivo	3.93	60.0	18.1	21.9	4.38	3.98
TUMBO	Gleisol úmbrico	Ap	Pradera	3.46	41.2	20.8	38.0	5.31	4.65
CASTRO	Cambisol gleico	Ap	Pradera	7.08	60.1	18.1	21.8	4.99	4.69
CASTRO	Cambisol gleico	Ap	Cultivo	5.89	65.9	18.8	15.3	4.43	4.26
CASTRO	Cambisol gleico	Bw	—	0.49	48.8	15.1	36.1	5.26	4.52
CASTRO	Cambisol gleico	2Btg	—	0.42	26.8	32.4	40.8	4.92	3.72
MATODOSO	Fluvisol úmbrico	Ap	Pradera	3.89	66.2	17.5	16.3	5.21	4.49
MATODOSO	Fluvisol úmbrico	Ap	Cultivo	2.80	67.4	14.6	18.0	5.58	4.81
ACROA	Gleisol úmbrico	ACg	—	0.43	6.7	14.6	78.7	8.40	7.38

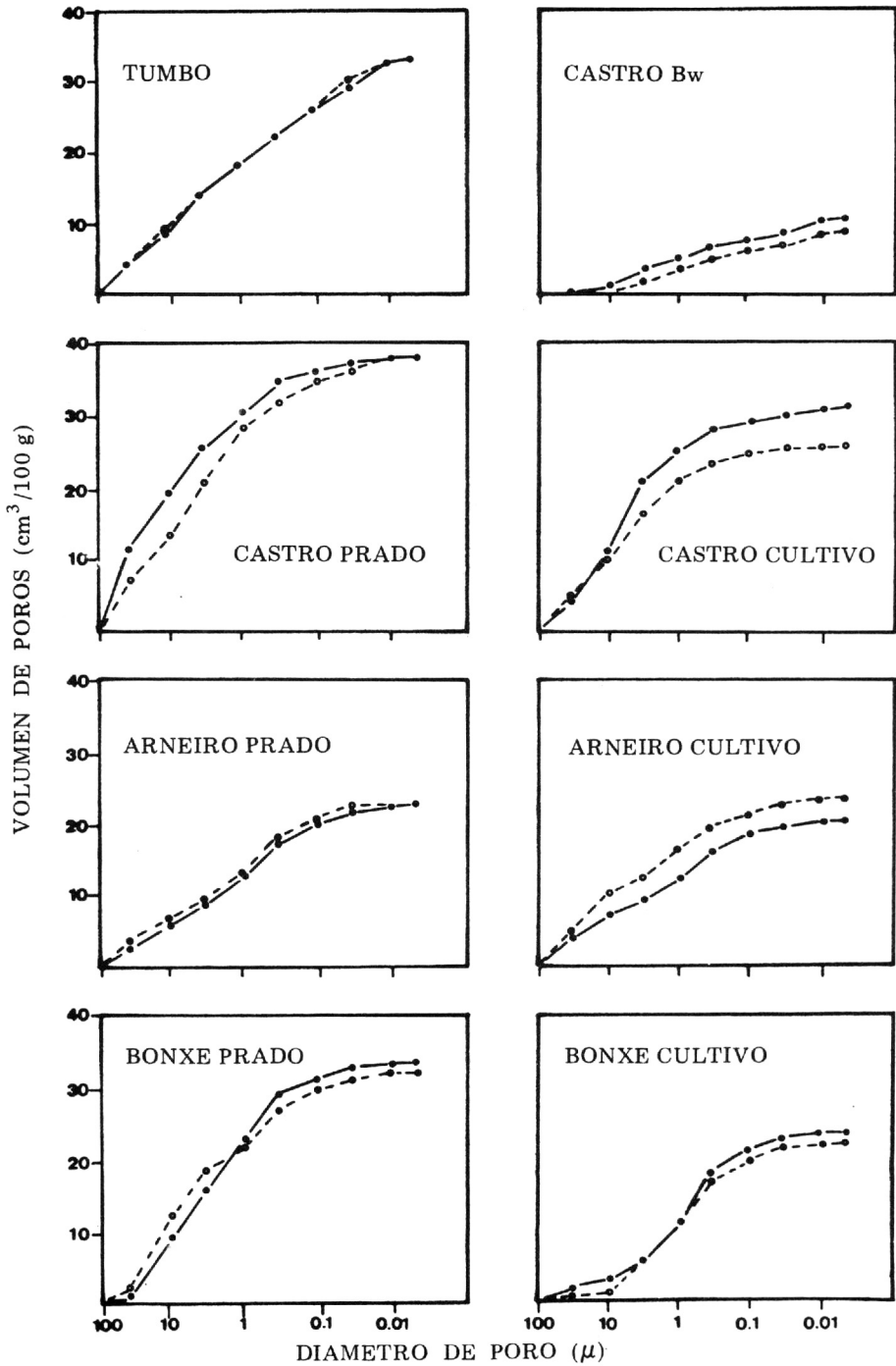


FIG. 1.—Duplicidad de las curvas de entrada de mercurio para las muestras de suelo analizadas. (—): 1.<sup>a</sup> determinación (-----): 2.<sup>a</sup> determinación.

tes superficiales de Castro, Arneiro y Bonxe, muy arenosos, la curva tiende a ser sigmoidal y la cantidad de Hg que entra a diámetros de poro inferiores a  $0.1 \mu$  supone un 9.8 y un 4.3% del total.

Por el contrario, en Tumbo y en el horizonte Bw de Castro, más arcillosos, la cantidad de Hg que ocupa los sucesivos intervalos de tamaño de poros es relativamente constante, y por debajo de  $0.2 \mu$ , éstos suponen el 20.2 y el 36.1% respectivamente.

Si analizamos el volumen total de poros (Tabla 2), se encuentra que la variabilidad entre los dos análisis realizados para cada muestra es en general pequeña, encontrándose sin embargo diferencias según que el suelo estuviese dedicado a pradera o cultivo. En los suelos de prado las diferencias son muy pequeñas, con variaciones que no superan en ningún caso el 4%. Los suelos cultivados presentan una mayor variabilidad en cuanto a la repetición de las medidas, aunque en ningún caso se superan diferencias del 14%.

En cuanto a las distintas fracciones de poros (Tabla 2), se observa que las variaciones mayores se producen fundamentalmente en los poros mayores de  $3 \mu$  y en los poros inferiores a  $0.03 \mu$ , siendo el intervalo de poros comprendido entre 3 y  $0.03 \mu$  el que presenta la mayor constancia en las medidas.

Referente a la repetición de los valores de densidad aparente dentro de un mismo suelo, se encuentra que la variabilidad es muy pequeña, no encontrándose prácticamente diferencias entre los suelos dedicados a pradera o cultivados, si bien estos

últimos tienen una ligera tendencia a presentar valores algo superiores.

### *Influencia del tamaño y preparación de la muestra*

Uno de los principales inconvenientes que presenta la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio es la pequeña cantidad de muestra que se puede analizar, siendo el tamaño máximo del agregado de 2-3 cm de diámetro. A esta escala, sin embargo, se solapan un nivel de organización textural, que depende de la granulometría, y un nivel estructural que se modifica más fácilmente por acción de los factores externos. Estos dos niveles vienen a coincidir con el de porosidad en el interior del agregado y porosidad entre los agregados del suelo (Monnier *et al.*, 1973; Stengel, 1979). Se sabe que la densidad aparente aumenta al disminuir el volumen de la muestra y, por tanto, disminuye la porosidad. En efecto, cuanto más pequeño es el tamaño de la muestra, mayor es la probabilidad de eliminar los poros de mayores dimensiones.

En un intento de caracterizar la porosidad textural, se analizaron muestras de menor tamaño y sometidas a un tratamiento de redondeamiento por abrasión, tal como propone Guerif (1988). El tratamiento de redondeamiento por abrasión, a pesar de la manipulación realizada sobre la muestra, permitiría eliminar los poros de mayor tamaño, así como las posibles fisuras o grietas, consiguiéndose de este modo una mayor homogeneidad de la muestra a analizar.

Con objeto de estudiar las diferencias que se pudieran encontrar en los

TABLA 2

*Datos del volumen total de poros, volumen de diferentes fracciones y densidad aparente de las muestras de suelo analizadas por duplicado.*

Suelos	V total	$\mu$ cm <sup>3</sup> /100 g										$<0.01$ $\mu$	d ap. (g cm <sup>-3</sup> )
		100-30	30-10	10-3	3-1	1-0.3	0.3-0.1	0.1-0.03	0.03-0.01	$\mu$			
Bonxe pradera (1) . . . .	33.62	1.17	8.27	6.51	7.35	5.46	2.57	1.38	0.78	0.13	1.328		
Bonxe Pradera (2) . . . .	31.81	2.75	9.80	3.42	6.06	5.12	2.55	1.31	0.69	0.11	1.345		
Bonxe cultivo (1) . . . .	22.89	1.92	1.51	2.32	5.95	6.33	3.14	1.39	0.22	0.11	1.118		
Bonxe cultivo (2) . . . .	21.00	0.59	1.08	4.14	5.51	5.14	2.61	1.34	0.56	0.03	1.609		
Arneiro prado (1) . . . .	22.91	3.44	2.94	2.75	3.72	4.93	2.48	1.50	0.99	0.16	1.529		
Arneiro prado (2) . . . .	22.86	4.12	3.02	2.81	3.72	4.75	2.37	1.34	0.65	0.08	1.558		
Arneiro cultivo (1) . . . .	19.82	4.33	2.71	2.07	3.24	3.56	2.18	1.17	0.49	0.07	1.699		
Arneiro cultivo (2) . . . .	22.96	5.10	4.89	2.55	3.34	3.42	1.98	1.11	0.47	0.10	1.653		
Tumbo pradera (1) . . . .	33.60	4.65	4.59	5.75	4.33	4.06	3.10	3.31	3.40	0.41	1.266		
Tumbo pradera (2) . . . .	33.98	4.80	4.90	5.35	4.23	4.10	3.07	3.37	3.57	0.59	1.341		
Castro pradera (1) . . . .	38.42	12.17	8.14	5.63	4.90	3.61	1.79	1.16	0.98	0.04	1.228		
Castro pradera (2) . . . .	38.42	7.13	6.20	7.92	6.58	4.65	2.11	2.52	1.31	0.00	1.229		
Castro cultivo (1) . . . .	31.07	3.93	7.29	9.42	4.20	2.89	1.54	0.93	0.71	0.16	1.352		
Castro cultivo (2) . . . .	24.85	4.52	5.54	6.55	3.82	2.50	1.30	0.60	0.03	0.00	1.341		
Castro Bw (1) . . . . .	11.62	1.00	1.33	1.66	1.54	1.25	1.13	1.14	2.06	0.51	2.032		
Castro Bw (2) . . . . .	9.01	0.20	1.01	1.37	1.36	1.34	0.72	1.09	1.51	0.41	2.004		



valores de porosidad y en la distribución dimensional de los poros, las determinaciones se han realizado, en siete de los suelos estudiados, con agregados naturales de 2-3 cm de diámetro y con agregados redondeados por abrasión de 2-3 mm de diámetro (volumen de la muestra aproximadamente de  $1 \text{ cm}^3$  en ambos casos).

En la Tabla 3 se presentan para los dos tipos de muestras los resultados del volumen total de poros ( $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ ) y la densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ). El redondeamiento de los agregados y la disminución del tamaño supone, en general e independientemente de la granulometría (hay que exceptuar el horizonte Bw de Castro), un incremento de la densidad aparente en torno al 10%. Este aumento se traduce en una disminución importante del volumen total de poros.

El efecto de la disminución del tamaño y redondeamiento de los agregados en la distribución dimensional de los poros se analiza en las figuras 2 y 3. Se observan dos comportamientos diferentes según la granulometría de la muestra.

Los suelos más arenosos (Armeiro y Matodoso) presentan para los agregados naturales de 2-3 cm de diámetro una distribución bimodal de los tamaños de poros, localizándose el primer máximo en la fracción de poros mayor de  $10 \mu$  y el segundo entre  $3$  y  $0.3 \mu$ . La disminución del tamaño y redondeamiento de los agregados implica la desaparición de este tipo de distribución, consecuencia de la disminución de los poros mayores de  $10 \mu$ .

Las restantes muestras presentan

un volumen total de poros menos importante y también lo es la cantidad de Hg que entra para diámetros equivalentes mayores de  $10 \mu$ . Las curvas de entrada de mercurio en los agregados naturales de los horizontes Bw y 2Btg de Castro, presentan también un carácter bimodal, aunque los dos máximos están desplazados ahora hacia diámetros de poro equivalentes menores, de modo que el primero se localiza entre  $3$  y  $0.3 \mu$  y el segundo por debajo de  $0.1 \mu$ . En el horizonte ACg (A Croa), de origen terciario, la fase principal de entrada de Hg, se inicia a diámetros de poro equivalente menores de  $0.1 \mu$ , y aparentemente continua a la presión máxima ejercida de  $2000 \text{ Kg cm}^{-2}$  ( $0.006 \mu$ ) (Fig. 3).

Prescindiendo de la muestra procedente del horizonte Bw, por su falta de homogeneidad, se aprecia que en muestras arcillo-arenosas, el redondeamiento puede suponer también una disminución de los poros de mayor tamaño. Por el contrario, en muestras extraordinariamente arcillosas, como es el caso de A Croa, los resultados obtenidos con agregados naturales y redondeados son muy similares. (Fig. 3).

La segunda fase de entrada de Hg en los suelos arcillo-arenosos y la fase de entrada principal en A Croa, podría indicar la subdivisión del espacio poroso textural en dos compartimentos, tal como propone Fies (1984): uno lagunar, en la matriz del suelo y otro propio de la fase arcillosa. La porosidad lagunar ha sido estimada por este autor como el volumen ocupado por los poros de diámetro comprendido entre  $100$  y  $0.05 \mu$ .

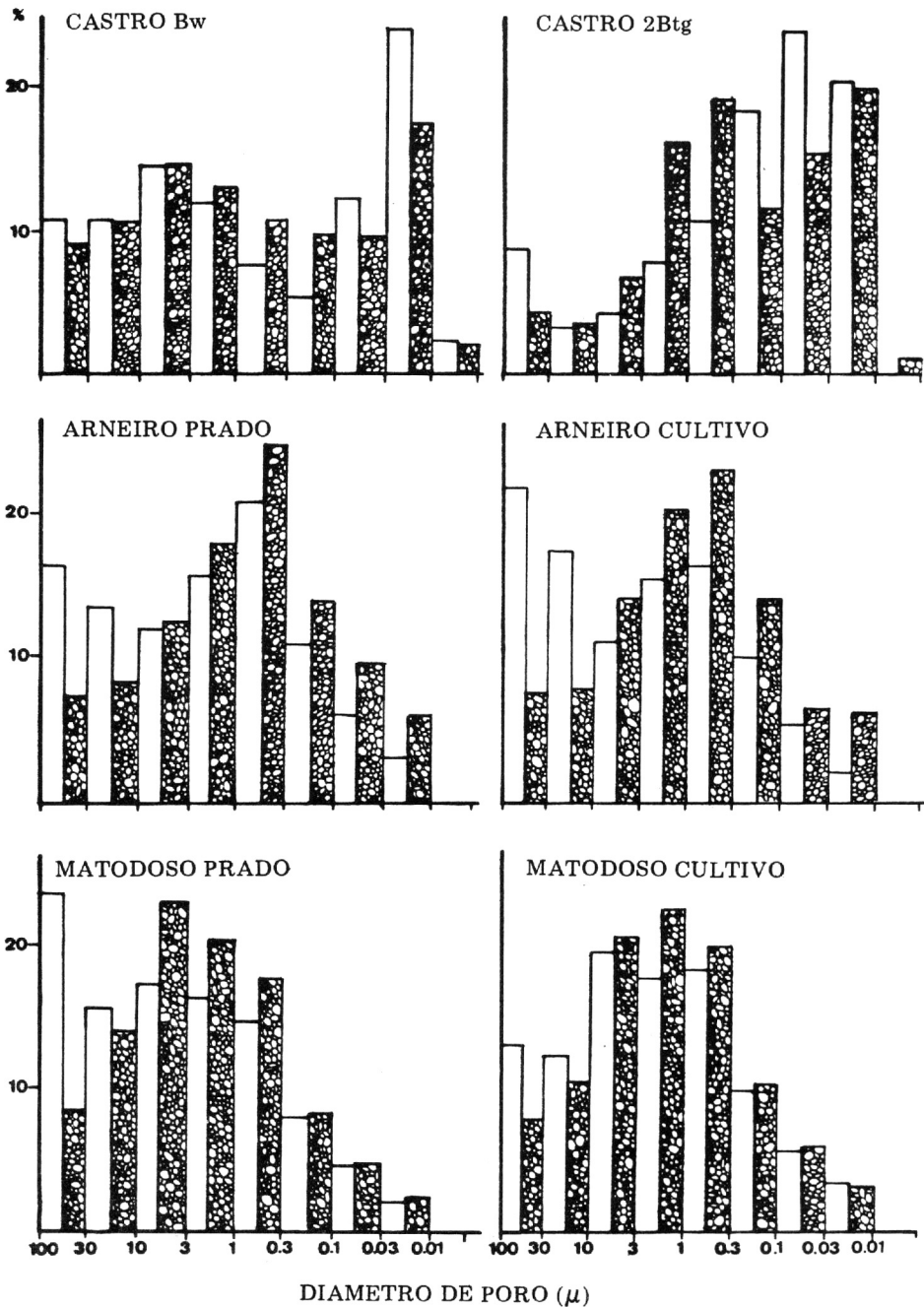


FIG. 2.—Distribución dimensional de los poros en agregados naturales de 2-3 cm de diámetro (□) y agregados redondeados de 2-3 mm de diámetro (▨), para muestras de suelo arenosas y arcillo-arenosas.

TABLA 3

*Resultados del volumen total de poros y densidad aparente de los agregados naturales de 2-3 cm de diámetro y de los agregados redondeados de 2-3 mm de diámetro.*

Suelos	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )		Volumen total de poros (cm <sup>3</sup> /100 g)	
	2-3 cm	2-3 mm	2-3 cm	2-3 mm
Arneiro pradera. . . . .	1.543	1.689	22.91	21.85
Arneiro cultivo . . . . .	1.676	1.765	21.39	18.83
Matodoso pradera . . . . .	1.370	1.565	28.26	22.74
Matodoso cultivo. . . . .	1.501	1.633	23.04	20.26
Castro Bw . . . . .	2.018	1.792	10.32	17.96
Castro 2Btg . . . . .	1.785	2.080	16.04	11.38
A Croa ACg . . . . .	1.659	1.769	19.70	19.61

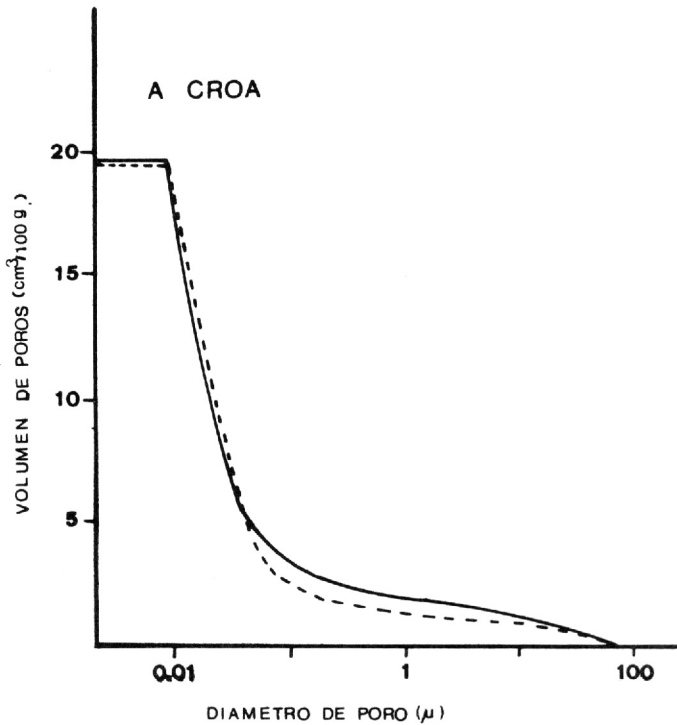


FIG. 3.—Distribución dimensional de los poros en agregados naturales de 2-3 cm de diámetro (—) y agregados redondeados de 2-3 mm de diámetro (-----), para una muestra de suelo arcillosa.

## DISCUSION

Es sorprendente que no exista hasta el momento una terminología aceptada internacionalmente para clasificar los poros del suelo según su función, encontrándose en la bibliografía un número elevadísimo de clasificaciones (Kubiena *et al.*, 1963; Brewer, 1964; FAO, 1966; Scheffer y Schachtschabel, 1970; Smart, 1975; Greenland, 1977).

Merece destacar por su interés en relación con la retención de agua por el suelo la de Scheffer y Schachtschabel, 1970. Estos autores establecen 4 tipos de poros según su función: de drenaje rápido (mayor de  $50 \mu$ ), de drenaje lento ( $50-10 \mu$ ), de retención de agua útil ( $10-0.2 \mu$ ) y de retención de agua no utilizable (menor de  $0.2 \mu$ ). Otra clasificación interesante que se ha utilizado mucho en los últimos años es la de Greenland (1977) distinguiendo: poros de transmisión ( $500-50 \mu$ ), de almacenamiento ( $50-0.5 \mu$ ) y residuales ( $< 0.5 \mu$ ).

En la Tabla 4 se presentan para los suelos estudiados el porcentaje en volumen de distintas fracciones de poros de acuerdo con las clasificaciones antes mencionadas. Sin perjuicio de un análisis del conjunto de datos en un próximo trabajo, se puede destacar, comparando pares de muestras, la reducción drástica de la porosidad de transmisión y almacenamiento en las muestras que proceden del subsuelo, al compararlas con las del horizonte superficial, lo que concuerda con el carácter impermeable o poco permeable de estos materiales (Díaz-Fierros, 1968; Gutiérrez *et al.*, 1971).

Desde el punto de vista metodo-

lógico, el análisis de las muestras por duplicado, indica que el margen de fiabilidad de los resultados es aceptable, teniendo en cuenta que las tierras de labrar se caracterizan por una importante variabilidad espacial de la estructura. En efecto, el análisis morfológico permite apreciar en ellas la presencia de discontinuidades subverticales y reconocer unidades a escala decimétrica y centimétrica (terrones, agregados, etc.) con sistemas porosos bien diferenciados (Papy, 1987).

A pesar de la disparidad entre muestras en la fase principal de entrada de mercurio, el volumen total se conoce con una precisión aceptable, de modo que en estudios generales, la caracterización del espacio poroso de un horizonte, a efectos de comparación con otros, podría llevarse a cabo a partir de una sola muestra. Por otra parte, si se comparan los valores de densidades aparentes de las muestras analizadas con el volumen total de poros (Tablas 2 y 3), se encuentra una relación muy buena entre ambos parámetros, de forma que cuanto mayor es la densidad aparente del agregado analizado, menor es el volumen total de poros ( $r^2 = 0.79$   $n = 24$ ).

Estudiando agregados artificiales, obtenidos al mezclar arena gruesa o arena fina y arcilla en proporciones diversas, Fies (1984) demostró que el límite entre los sucesivos compartimentos del espacio poroso, coincide en muchos casos con un punto de inflexión sobre la curva que describe la entrada de mercurio. Comparando agregados redondeados y naturales se aprecia que, al aumentar

TABLA 4

*Datos del porcentaje en volumen de distintas fracciones de poros, porcentaje de porosidad total, diámetro equivalente y superficie específica de las muestras analizadas.*

Suelos	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>			% P total	Diámetro equivalente (μ)	Superficie específica (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )
	100-50 μ	50-0.5 μ	<0.5 μ			
Bonxe pradera . . . . .	0.62	34.25	8.87	43.74	9.06	4.47
Bonxe cultivo . . . . .	0.78	19.70	9.20	29.68	1.19	3.15
Arnejo pradera . . . . .	3.38	21.59	10.35	35.33	15.91	4.64
Arnejo cultivo . . . . .	4.96	22.19	8.68	35.83	28.74	3.20
Tumbo pradera . . . . .	3.96	24.42	15.68	44.06	7.26	14.49
Castro pradera . . . . .	7.09	32.06	8.04	47.19	38.66	4.19
Castro cultivo . . . . .	2.88	29.87	4.91	37.66	18.56	2.54
Castro Bw . . . . .	0.55	10.68	9.58	20.81	0.39	7.97
Castro 2Btg . . . . .	0.70	11.38	16.54	28.62	0.10	13.01
Matodoso pradera . . . . .	5.34	25.49	7.89	38.72	14.64	3.84
Matodoso cultivo . . . . .	2.99	22.61	8.98	34.58	3.08	4.49
A Croa ACg . . . . .	0.33	3.58	28.77	32.68	0.01	41.52

el tamaño de la muestra, pueden solaparse las fases de entrada que corresponden a la porosidad textural y a la estructural. Por ello, el tamaño de los agregados que se utilizan en el análisis dependerá de los objetivos del estudio a llevar a cabo.

En efecto, al investigar temas como la acción del laboreo sobre el suelo, la variable que interesa conocer es la porosidad estructural, fácilmente modificable por las técnicas de cultivo y por lo tanto más coyuntural. En este caso conviene utilizar un solo agregado natural. Esta porosidad resulta de la disposición de elementos como los microagregados, fragmentos de materia orgánica, partículas minerales gruesas, etc., y es necesario recordar que el límite superior teórico de la poro-

simetría de mercurio se cifra en las  $400 \mu$  de diámetro equivalente y en consecuencia esta técnica no es suficiente para caracterizar los macroporos.

Diversas propiedades físicas y mecánicas del suelo, como la capacidad de retención de agua útil, la resistencia a la ruptura, etc., dependen de la porosidad textural. Las medidas en varios agregados de 2-3 mm, con un volumen total similar al de un agregado natural de 1 a  $1.5 \text{ cm}^3$ , permite evaluar la magnitud de esta porción del espacio poroso en términos aproximados. En efecto, la disminución del tamaño de la muestra y la abrasión tienden a eliminar los macroporos, que pueden muchas veces equipararse a grietas o fisuras entre los elementos estructurales.

## CONCLUSIONES

1.—La porosimetría por intrusión de Hg se presenta como una técnica adecuada y fiable para el análisis de la porosidad y distribución dimensional de los poros del suelo en el rango de diámetros  $100-0.006 \mu$ .

2.—El análisis por duplicado de las muestras indica que el margen de fiabilidad de los resultados obtenidos mediante esta técnica es aceptable, siendo sin embargo las diferencias mucho menores en suelos con dedicación de pradera que en suelos cultivados.

3.—El hecho de que las dimensiones máximas de los agregados del suelo que se pueden analizar mediante esta técnica no pueda ser superior a 2-3 cm de diámetro, impide la caracterización de una buena parte de los poros entre los agregados. La disminución del ta-

maño de los agregados permitiría caracterizar, en términos aproximados, la porosidad textural o porosidad dentro del agregado. De todas formas, el tamaño de los agregados que se utilice en el análisis dependerá, en último término, de los objetivos del estudio que se lleve a cabo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Dr. Guido Vigna Guidi, Director del Istituto per la Chimica del Terreno (CNR) de Pisa (Italia) por permitir la realización de los análisis en el porosímetro de Hg y a Andrea Scotto por su asesoramiento técnico. Agradecen también a M.<sup>a</sup> José Montero la realización de los análisis de laboratorio de las muestras de suelo.

## BIBLIOGRAFIA

- BREWER, R., 1964. Fabric and mineral analysis of soil. Wiley. New York.
- CHURCHMAN, G. J. and PAYNE, D., 1983. Mercury intrusion porosimetry of some New Zeland soils in relation to clay mineralogy and texture. *J. Soil Sci.*, 34: 437-451.
- DIAZ-FIERROS, F., 1968. Contribución al estudio de las condiciones de agua de los suelos de Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago.
- FAO, 1966. Claves para la descripción de perfiles de suelos. Roma.
- FIES, J. C., 1984. Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes: comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4: 891-899.
- GREENLAND, D. J., 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? *Phil. Trans. Roy. Soc. (London) B*, 281: 193-208.
- GUERIF, J., 1988. Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux; revue bibliographique, mise au point technique. *Agronomie*, 8: 281-288.
- GUIITIAN OJEA, F. y CARBALLAS, T. 1976. Técnicas de análisis de suelos. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela.
- GUIITIAN OJEA, F., CARBALLAS, T. y PEREZ PUJALTE, A., 1971. Suelos de la zona húmeda española. VI: Pelosol. *An. Edafol. Agrobiol.*, 30: 303-322.
- KUBIENA, W. et al., 1963. Micromorphometric studies of soil pores. *An. Edafol. Agrobiol.*, 22: 551-567.
- LAWRENCE, G. P., 1977. Measurement of pore sizes in fine-textured soils: a review of existing techniques. *J. Soil Sci.*, 28: 527-540.
- LAWRENCE, G. P., 1978. Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. *J. Soil Sci.*, 29: 299-304.
- LAWRENCE, G. P., PAYNE, D. and GREENLAND, D. J., 1979. Pore size distribution in critical point freeze dried aggregates from clay subsoils. *J. Soil Sci.*, 30: 499-516.
- MONNIER, G., STENGEL, P. et FIES, J. C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente des petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24: 533-545.
- MURAY, P. S. and QUIRK, J. P., 1980. Freeze-dried and critical-point-dried clay a comparison. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 232-234.
- NAGPAL, N. K., BOERSMA, L. and DE BACKER, L. W., 1972. Pore size distributions of soil from mercury intrusion porosimeter data. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36: 264-267.
- NEWMAN, A. C. D. and THOMASSON, A. J., 1979. Rothamsted studies of soil structure. III: Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.*, 30: 415-439.
- PAPY, F., 1987. Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. *Agronomie*, 7: 111-121.
- ROOTARE, H. M., 1968. A short literature review of mercury porosimetry as a method of measuring pore-size distribution in porous materials and a discussion of possible sources of error in this method. *Aminco Lab. News* 4, 4A-4H.
- SARAKHOV, A. I., 1963. Some comments on the accuracy of the method of mercury porosimetry. *Russ. J. Phys. Chem.*, 37: 242-243.
- SCHEEFFER, F. and SCHACHTSCHABEL, P., 1970. *Lehrbuch der Bodenkunde*, 186, Enke Verlag, Stuttgart.
- SILLS, I. D., AYLMOORE, L. A. G. and QUIRK, J. P., 1973. A comparison between

- mercury injection and nitrogen sorption as methods of determining pore size distributions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37: 535-537.
- SILLS, I. D., AYLMORE, L. A. G. and QUIRK, J. P., 1974. Relationship between pore size distributions and physical properties of clay soils. Aust. J. Soil Res., 12: 107-117.
- SMART, P., 1975. Soil microstructure. Soil Sci., 119: 384-393.
- STENGEL, P., 1979. Utilization de l'analyse des systèmes de porosité por la caracterization de l'état physique du sol in situ. Ann. Agron., 30: 27-51.
- VIGNA GUIDI, G. e PINI, R., 1988. Uso del porosimetro a intrusione di mercurio e tecniche a luce laser nell'analisi del terreno. Giornate di studio sull'analisi del suolo. Verona: 332-352.

*Recibido: 27-11-90.*

*Aceptado: 22-7-91.*