

ESTRUCTURA FRACTAL DEL SUELO BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE MANEJO

A DUHOUR⁽¹⁾, C COSTA⁽²⁾, F MOMO⁽¹⁾, L FALCO⁽¹⁾

(1) Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Cruce de rutas 5 y 7. C.C. 221. C.P. 6700. Luján. Bs. As. Argentina.

(2) Departamento de Tecnología. Universidad Nacional de Luján. Correo electrónico: aduhour@mail.unlu.edu.ar

Recibido 25 de abril de 2003, aceptado 2 de mayo de 2004

FRactal structure of soils under different management systems.

We studied modifications in soil pore system analyzing its fractal structure. The study was performed for a natural situation and an agricultural one. Samples were taken from top horizons of typical Argiudoll soils, representative of the middle Luján river basin. Soil blocks were sampled and impregnated with polyester resin in order to obtain sections, which were photographed using a digital camera. Mass fractal dimension of pores and soil (D_{mp} and D_{ms}), and surface fractal dimension (D_s) were measured from the pictures. The results show that D_{ms} varies between 1.925 and 1.943, D_{mp} from 0.735 to 1.181, and D_s from 0.910 to 1.277 with the lower values corresponding to more degraded soils. Physical aggression effect is more evident in pore-system related parameters: D_{mp} and D_s .

Keywords: Argiudolls, fractal dimension, images, soil structure, soil quality, physical degradation

INTRODUCCION

El laboreo y la compactación degradan la estructura del suelo, cambiando la distribución de tamaño de poros debido a la destrucción de los macro y mesoporos y a la homogeneización de los tamaños de agregados y los espacios vacíos que quedan entre ellos (Gupta *et al.* 1989). El espacio poroso pierde así continuidad y se dificulta el movimiento del agua y el aire. Se requiere caracterizar esa degradación de la estructura mediante la utilización de indicadores que permitan valorar los cambios que se producen en la geometría del espacio poroso.

El suelo es un sistema geométricamente complejo que puede ser concebido como un objeto fractal (Anderson *et al.* 1998). Ello consiste en un objeto que conserva un patrón similar de forma a través de varias escalas de tamaño, lo que se conoce como autosemejanza. El patrón de autosemejanza puede ser caracterizado mediante una dimensión fractal que se relaciona con la estructura de agregados y poros del suelo (Anderson *et al.* 1998). Los parámetros fractales pueden ser relacionados con los cambios inducidos por el laboreo del suelo (Giménez *et al.* 1998). Por ejemplo, una homogeneización del tamaño de partículas producirá, inevitablemente, un descenso en el va-

lor numérico de la dimensión fractal (Harte 2001). En la Argentina se han realizado algunos trabajos enfocados en el análisis de la estructura fractal del suelo por medio del estudio de la distribución de tamaños de agregados, encontrando una clara relación entre este parámetro y el uso del suelo (Filgueira *et al.* 1999).

El objetivo del presente trabajo es caracterizar, a través de sus dimensiones fractales, el estado de deterioro de horizontes superficiales de suelos sometidos a diferentes manejos e intensidades de uso. La hipótesis del trabajo es que un uso más intenso, con mayor deterioro físico, estará asociado a menores valores de las dimensiones fractales del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Las muestras se obtuvieron en dos sitios ubicados en la cuenca media del río Luján (provincia de Buenos Aires, Argentina), caracterizados por un clima templado húmedo y una precipitación media anual del orden de los 1000 mm. Se trabajó en dos sitios cubiertos por Argiudoles Típicos, cuyo horizonte superficial es de textura franco limosa, estructura granular a bloques subangulares.

La principal actividad en el Sitio 1 (59° 4' 31" O y 34° 35' 53" S) es agrícola - ganadera; se seleccionaron tres lotes con distinta historia de uso

Tabla 1. Historia de uso y grado de agresión física en tres lotes agrícola – ganaderos y un lote sin cultivo durante 30 años. Se indica la secuencia de cultivos anuales (Ca) y pasturas plurianuales (PP) seguido de los años de ocupación del suelo por cada uno.

Table 1. Soil use history and physical disturbance degree in three agricultural fields and a natural situation. Table shows the sequence of annual species (Ca) and pastures (PP) cultivated, and the years of soil occupation.

Lote	Rotación	Grado de agresión física
SN	30 años sin cultivo	Bajo
P97	Ca 1 – PP 5 – Ca 2 – PP 3	Medio
P98	Ca 3 – PP 4 – Ca 2 – PP 2	Medio
P99	Ca 6 – PP 2 – Ca 2 – PP 1	Alto

en un período que comprende los últimos 12 años, con pasturas sembradas en 1997 (P97), 1998 (P98) y en 1999 (P99). El Sitio 2 (59° 11' 44" O y 34° 33' 5" S), en adelante "SN", no ha sido sometido al uso agrícola o ganadero durante los últimos 30 años, las especies vegetales predominantes son gramíneas. En la Tabla 1 se presenta la rotación de cultivos y la escala de agresión física de los lotes.

Se calcularon las dimensiones fractales de masa (D_m) y de superficie (D_s) por el método de recuento de cajas ("Box-counting") (Anderson *et al.* 1998), aplicando la técnica a imágenes binarias (blanco y negro), en las que aparece en negro la estructura de interés: la parte sólida del suelo o los poros para su respectiva D_m , o la pared de los poros para el cálculo de D_s . La D_m toma valores entre 0 y 2 para objetos contenidos en un espacio euclídeo de dos dimensiones ($E = 2$), y entre 0 y 3 para objetos de tres dimensiones ($E = 3$). La dimensión fractal de superficie (D_s) indica la rugosidad o la tortuosidad de una línea o un plano (Anderson *et al.* 1998). La D_s toma valores entre 1 y 2 para líneas o curvas cuya dimensión euclídea E es igual a 2, como es el caso de imágenes tomadas de secciones de suelo. La estimación de la dimensión de Box-counting se realiza superponiendo a la estructura considerada una grilla de tamaño de malla (s) y contando el número de casillas que contienen parte de la estructura. Este procedimiento da un número N que depende del tamaño de malla s utilizado. Reemplazando la grilla por otras de distinto tamaño de malla, se determina el correspondiente número $N(s)$. En el caso de que la figura considerada sea fractal, el número de casillas contadas en cada paso se relaciona con el tamaño de malla s utilizado según una función potencial de la forma (Peitgen 1992):

$$N(s) = \left(\frac{1}{s}\right)^D \quad (1)$$

donde D es la dimensión fractal de Box-counting. Tomando el logaritmo a ambos lados de la ecuación (1) tenemos:

$$\log(N(s)) = D \cdot \log\left(\frac{1}{s}\right) \quad (2)$$

considerando el siguiente cambio de variables:

$$y = \log(N(s)) \quad \text{y} \quad x = \log\left(\frac{1}{s}\right), \text{ la ecuación (2)}$$

toma la forma de una ecuación lineal en la que D es la pendiente de la recta. Finalmente, para obtener el valor de la D , se grafica el $\log(N(s))$

en función del $\log\left(\frac{1}{s}\right)$ y se ajustan los puntos

a una recta cuya pendiente será la dimensión de Box-counting.

En cada lote se tomaron cinco bloques de suelo al azar, de un tamaño aproximado de 80 mm de lado, del horizonte superficial sin disturbar, en una grilla de puntos equidistantes 25 m (Pilatti, Orellana 1987). Se determinó la densidad aparente (método del cilindro) en 8 muestras de suelo seleccionadas al azar. Las muestras de suelo tomadas para el análisis fractal fueron impregnadas con resina poliéster bajo vacío según Fitzpatrick (1984). En la resina se agregaron un colorante fluorescente y un pigmento blanco para mejorar el contraste entre los poros y el suelo (Giménez *et al.* 1998). Se realizó un corte de 10 mm de espesor, en todos los casos se tomaron cortes perpendiculares a la superficie del suelo, suponiendo una estructura isotrópica del mismo. El pulido se realizó a mano.

Una vez finalizado el pulido de las muestras se obtuvieron las imágenes mediante fotografías tomadas con una cámara digital. Se utilizaron lentes de aproximación Tiffen® para obtener una distancia focal de 127mm, lo que permitió obtener un tamaño de píxel equivalente a 167 μm , que coincide con el tamaño de los poros de transmisión o macroporos del sistema poroso del suelo; como única fuente de iluminación se utilizó una lámpara de luz ultravioleta que al producir fluorescencia en la matriz resinosa, permitió obtener un gran contraste.

Las imágenes, obtenidas en color, fueron convertidas a escala de 256 niveles de gris. Las etapas siguientes del procesamiento de las imágenes se realizaron con el programa Scion Image® for Windows (Scion Corporation,

Tabla 2. Valores de D_{ms} , D_{mp} , D_s y densidad aparente en relación con la agresión física del suelo. Para las regresiones de donde se obtuvieron las dimensiones fractales, todos los R^2 fueron mayores a 0,95.

Table 2. D_{ms} , D_{mp} , D_s and bulk density related to soil physical aggression.

Lote	Escala de agresión física	D_{ms}	D_{mp}	D_s	Densidad aparente (Mg/m ³)
SN	Baja	1,943 a	1,181 a	1,277 a	1,110 a
P97	Media	1,943 a	0,735 b	0,910 b	1,358 b
P98	Media	1,927 b	0,938 ab	1,018 ab	s/d
P99	Alta	1,925 b	0,818 b	0,959 b	1,287 b

Para cada lote, los promedios que muestran letras iguales no poseen diferencias significativas a un nivel de 0,05 según el test LSD.

www.scioncorp.com). En este trabajo se analizan tres objetos geométricos del suelo que fueron separados mediante el procesamiento de las imágenes en escala de grises: la parte sólida del suelo, los poros y la pared de los mismos. Las dimensiones fractales obtenidas en cada caso son la dimensión de masa de los sólidos del suelo (D_{ms}), la dimensión de masa del espacio de poros (D_{mp}) y la dimensión de superficie (D_s).

Para el cálculo de la D_{ms} , D_{mp} , y D_s se usó el programa GRAF® (Groupe de Recherche en Analyse Fractal, ©1992). Los resultados fueron evaluados mediante análisis de varianza, tomando como variable independiente el lote y como variable dependiente la dimensión fractal a analizar. Se evaluaron las diferencias entre los sitios mediante el test LSD, con un nivel de significación de 0,05 (Zar 1996).

RESULTADOS Y DISCUSION

Las dimensiones fractales de masa del suelo (D_{ms}) y del espacio poroso (D_{mp}) y la dimensión fractal de superficie (D_s) mostraron un mayor valor en el sitio natural de referencia (Tabla 2). Esto guarda relación con una mayor irregularidad en las formas geométricas del suelo asociadas a la estructura (Mandelbrot 1997). En el suelo testigo hay una distribución más heterogénea de las formas o tamaños de los agregados o los poros en el suelo y una mayor tortuosidad de las líneas de contacto poro - agregado.

La D_{ms} (dimensión fractal de masa de los sólidos del suelo) diferenció dos grupos de tratamientos SN-P97, suelos con agresión física baja y media, y P98-P99, con agresión física media y alta. El mayor valor se obtuvo en los lotes SN y P97, que se diferenciaron significativamente de los lotes P98 y P99. Se encontró una disminución del valor de D_{ms} a

medida que aumenta la agresión física al suelo, y a medida que aumenta la densidad aparente. Otros autores hallaron resultados diferentes para la D_{ms} , reportando una relación directa entre la D_{ms} y la compactación (Oleschko 1999).

Nuestros resultados muestran un efecto distinto del uso del suelo sobre el sistema de poros y sobre la parte sólida del suelo. El valor de D_{ms} no podría ser utilizado para diferenciar suelos con distintos niveles de compactación dado que si bien se observó una clara disminución de la densidad aparente en los lotes agrícola – ganaderos, la D_{ms} no mostró el mismo comportamiento.

Los resultados hallados para D_{mp} (dimensión fractal de masa del espacio poroso) mostraron también un mayor valor para el sistema natural (SN), diferenciándose significativamente de los lotes P97 y P99.

La D_{mp} aumentó a medida que la densidad aparente del suelo fue menor, mostrando la clara relación de este parámetro con la compactación, y por lo tanto con la agresión física al suelo.

La D_s (dimensión fractal de superficie), encontró su mayor valor en el lote SN, al igual que D_{ms} y D_{mp} , revelando un grado mayor de heterogeneidad en las líneas de contacto poro-suelo en el sistema natural. El análisis de varianza mostró que el valor de D_s para el lote SN se diferenció significativamente de los lotes agrícola – ganaderos P97 y P99. En esta parte del análisis se obtuvieron algunos valores de D_s menores que uno, lo cual es físicamente imposible. Este error se debe seguramente a que en el procesamiento de la imagen, las líneas obtenidas pueden aparecer cortadas dando valores de dimensión fractal menores;

esos valores entonces, deben interpretarse como iguales a uno.

Los valores promedio de densidad aparente (D_p) fueron más bajos en el lote SN (1,110 Mg/m³) y altos en los lotes P97 y P99, 1,358 Mg/m³ y 1,287 Mg/m³ respectivamente.

Los resultados obtenidos para D_{ms} , D_{mp} y D_s se encuentran dentro del rango de valores encontrado por otros autores (Anderson et al 1998), incluso para suelos franco limosos como los del presente trabajo (Giménez et al. 1998).

Estos resultados muestran el efecto de la degradación física en el sistema de poros del suelo, tanto en su volumen (D_p) como en su geometría (D_{mp} y D_s). Diferenciando estos parámetros una situación prístina de situaciones bajo uso agrícola y ganadero.

Se observó un efecto significativo sobre el sistema de poros tanto cuando el uso consistió en un predominio de pasturas (P97) como en el lote con predominio de cultivos anuales (P99).

Este efecto consistió en la modificación de la distribución de tamaños y formas de los poros del suelo, evidenciado en una menor D_{mp} , la modificación de las líneas de contacto poro-suelo, que puede verse en una menor D_s , y el aumento significativo de la densidad aparente. Este resultado se relaciona con los de Oleschko (1999) que encuentra una relación positiva entre la compactación y la D_{mp} .

La D_{mp} y la D_s , como parámetros geométricos del sistema de poros, pueden ser muy útiles en la predicción de parámetros físicos relacionados con el movimiento de fluidos del suelo.

Todos los parámetros fractales analizados presentaron un mayor valor en el sistema natural y un menor valor en los lotes agrícola - ganaderos,

REFERENCIAS

- Anderson A. N., Mc Bratney A. B., Crawford J. W. 1998. Application of fractals to soil studies. *Advances in Agronomy*. Vol. 63. 76 pp.
- Filgueira R. R., Pachepsky Y. A., Fournier L. L., Sarli G. O., Aragon A., 1999. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling. *Soil Science*, 164:217-223.
- Fitzpatrick E. A., 1984. *Micromorphology of soils*. Cambridge. University Press. 433 pp.
- Giménez, D., Allmaras, R. R., Huggins, D. R., Nater, E. A. 1998. Mass, Surface and fragmentation fractal dimensions of soil fragments produced by tillage. *Geoderma*. 86:261-278.
- Gupta S. C., Sharma P. P., Defranchi S. A. 1989. Compaction effects on soil structure. *Advances in Agronomy*, 42:311-338.
- Harte, D. 2001. *Multifractals. Theory and applications*. Chapman & Hall/ CRC. Boca Raton. 248 pp.
- Mandelbrot B. B. 1997. *La geometría fractal de la naturaleza*. Tusquets Editores. Barcelona. 662 pp. 1^{er} Edición española de *The fractal geometry of nature*. 1982. W. H. Freeman. New York.
- Oleschko K. 1999. Delesse principle and statistical fractal sets: 2. Unified fractal model for soil porosity. *Soil & Tillage Research*. 52:247-257.
- Peitgen H., Jurgens H., Saupe D. 1992. *Fractal for the classroom. Part I*. Springer-Verlag. 452 pp.
- Pillatti M. A. y Orellana J. A. 1987. Instrucciones para tomar muestras de suelos. *Comunicaciones FAVE* Nro 2. 10 pp.
- Zar J. H. 1996. *Biostatistical analysis*. Third Edition. Prentice Hall. New Jersey. 662 pp.