



## C1P26. MODELO FRACTAL: APLICADO A LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN SUELOS FRANCO Y FRANCO ARENOSOS

Gelati Pablo R; Sarli Guillermo O; Lozano Luis A. y Filgueira Roberto R.

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. Av 60 y 119 s/n. 1900 La Plata. Provincia de Buenos Aires. Argentina.  
prgelati@gmail.com

### RESUMEN

La geometría fractal ha permitido describir teóricamente estructuras que se observan en la naturaleza, la distribución espacial de raíces, longitudes de costas y la distribución de tamaño de partículas (DTP) en el suelo. Un objeto fractal está compuesto de una cantidad de estructuras similares superpuestas, visibles a cualquier nivel de detalle, esta propiedad es la autosimilitud. El material en un objeto fractal se distribuye en forma heterogénea, pero no al azar y se ve idéntico, independientemente de la escala observada, en este sentido han planteado dudas sobre la validez de este marco teórico. Se ha utilizado la geometría fractal para interpretar la dinámica de los procesos formadores del suelo mediante el estudio, de la DTP. Se vio que la DTP de suelos finos puede asimilarse con modelos fractales mientras que la de suelos gruesos no. Las texturas intermedias quedarían en una transición. Se planteó, investigar mediante el modelo fractal la DTP en suelos francos y franco arenosos de la pradera pampeana. Se evaluaron muestras superficiales de suelos luego aplicarles el pretratamiento intensivo de pipeta de Robinson. En promedio, para suelos francos, el modelo describió el 56,8% de la masa mientras que, en FA, alcanzó al 38,4%, en ambos grupos con ( $p < 0,01$ ). Las D entre grupos no arrojaron diferencias ( $p < 0,87$ ) mientras que las C logró separarlos ( $p = 0,001$ ). La referencia única de D, como parámetro de los suelos es una información incompleta que necesita del parámetro C para interpretar el escalamiento de las partículas. El contenido de arenas resulta ser la limitación para ajustar el modelo y en estos suelos pampeanos, el origen las características de los materiales originales, así como la dinámica de transporte serían las variables principales.

**Palabras claves:** Textura, Fragmentación, Material original.

### INTRODUCCIÓN

La geometría fractal (Mandelbrot, 1982) ha permitido describir teóricamente estructuras que se observan en la naturaleza. Es así que las características geométricas de la distribución espacial de las raíces, las longitudes de las costas y fronteras, el fraccionamiento de una roca, la distribución de tamaño de partículas en el suelo, entre otros, pueden ser idealizados satisfactoriamente mediante esta teoría (Korvin, 1992; Tyler & Wheatcraft, 1992; Filgueira *et al.*, 2003; 2005; Vdovic *et al.*, 2010; Caruso *et al.*, 2011). Un objeto fractal está compuesto de una cantidad de estructuras similares superpuestas, visibles a cualquier nivel de detalle. Esta propiedad se conoce como autosimilitud. El material en un objeto fractal se distribuye en forma heterogénea, pero no al azar, de forma que un patrón de generación se ve idéntico, al menos en el sentido estadístico, independientemente de la amplificación con que se esté observando. En un fractal matemático los detalles se ven idénticos en cualquier nivel de amplificación mientras que en un fractal natural es esperable que el nivel de repetición de la propiedad particular sea limitado a varios órdenes de magnitud. En este sentido, en una publicación polémica Avnir *et al.* (1998) han planteado dudas sobre la validez de este marco teórico, sobre todo en el tema del rango de aplicación de la propiedad de autosimilitud, que en vez de ser infinito como en el fractal matemático, sólo abarcaría uno o dos órdenes de magnitud en los fractales naturales.

En la ciencia del suelo se ha utilizado la geometría fractal para arrojar nueva luz sobre la compleja dinámica de los procesos formadores del suelo mediante el estudio de la distribución de tamaño de partículas (DTP) (Tyler & Wheatcraft, 1992; Hyslip & Vallejo, 1997; Bittelli *et al.*, 1999; Taguas *et al.*, 1999; Perfect *et al.*, 2002; Millán *et al.*, 2003; Stanchi *et al.*, 2006, 2008).

La DTP, es una de las características más estables en un suelo. El interés en su determinación, radica en que está relacionada con otras propiedades físicas y químicas, como ser: porosidad, interacción con los fluidos y solutos, capacidad de intercambio catiónico, susceptibilidad a la erosión y desertificación, entre otras (Campbell & Shiozawa, 1992; Vdovic *et al.*, 2010).



Si bien diversos autores han encontrado que la DTP de algunos suelos siguen distribuciones fractales (Tyler & Wheatcraft, 1992; Taguas *et al.*, 1999; Filgueira *et al.*, 2006; Filgueira *et al.*, 2009; Gelati *et al.*, 2016). Tyler & Wheatcraft (1992) concluyeron que sólo algunos suelos dentro del triángulo textural podrían tener este tipo de DTP. En este sentido, Filgueira *et al.*, (2004), encontraron que la DTP en suelos del centro oeste de la provincia de Buenos Aires, no respondían a este tipo de distribución. Bártoli *et al.*, (1991), confirmaron que los suelos de textura fina son bien caracterizados por una distribución fractal de las partículas, mientras que los cuarzós arenosos, no. Suelos de la pampa ondulada, Argiudoles típicos, franco limosos, con tenores de arena menores al 15%, el modelo fractal describe adecuadamente la DTP (Gelati *et al.*, 2016). Behzad *et al.*, (2015), plantearon enfáticamente la necesidad de limitar el rango al tamaño de partículas para el cual el modelo fractal fue ajustado. Si bien diversos autores han encontrado que la DTP de algunos suelos puede ser caracterizada por una sola D (Turcotte, 1986; Tyler & Wheatcraft, 1992; Filgueira *et al.*, 2006), en otros estudios se han identificado más de una escala de dominio con distintas D fractales en el mismo suelo (Vdovic *et al.*, 2010).

La zonificación entre pampa ondulada y pampa arenosa, sería consecuencia de un proceso de selección granulométrica como resultado del transporte eólico desde las fuentes de aporte, con una sedimentación proximal de arena y una distal de limo. Es así que el material parental de los suelos grada desde limos loésicos en el este, hasta arenas limosas en el oeste (Gonzalez Bonorino, 1966).

Proponemos en este trabajo, investigar mediante el modelo fractal la distribución de tamaños de partículas en suelos de textura franca y franca arenosa en suelos de la pradera pampeana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron muestras superficiales (0-15 cm) de suelos agrícolas ubicadas en los partidos de Lincoln y Trenque Lauquen, las mismas, fueron secadas en estufa a 40°C con circulación de aire, desagregadas y tamizadas por 2 mm. Se realizaron sedimentaciones aplicando el pretratamiento exhaustivo de pipeta, buscando la máxima dispersión de las partículas, se eliminó materia orgánica con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y calor, se empleó NaOH 1 N y un agitador rotativo por 16 h (Gee & Bauder, 1986). Las probetas se completaron hasta 1000 mL con agua destilada. Las arenas se cuantificaron por tamizado. Todas las determinaciones se realizaron por duplicado. A partir de los resultados de las sedimentaciones Se realizaron las curvas de masa acumulada vs diámetro, los parámetros del modelo fractal, C y D, se obtuvieron luego de transformar los datos mediante log-log, empleando la ecuación 3.

$$\left(\frac{m_p}{m_t}\right) = \left(\frac{\phi_p}{\phi_t}\right)^{3-D} \quad (1)$$

$$m_p(\%) = C \cdot \phi^{3-D} \quad (2)$$

$$\log m_p(\%) = \log C + (3 - D) \cdot \log \phi \quad (3)$$

La ecuación 1, corresponde al modelo fractal teórico, la ecuación 2 surge de operar la con la ecuación (1) y la ecuación (3), es la expresión de cálculo para los parámetros fractales, luego de transformar con logaritmos la ecuación 2.

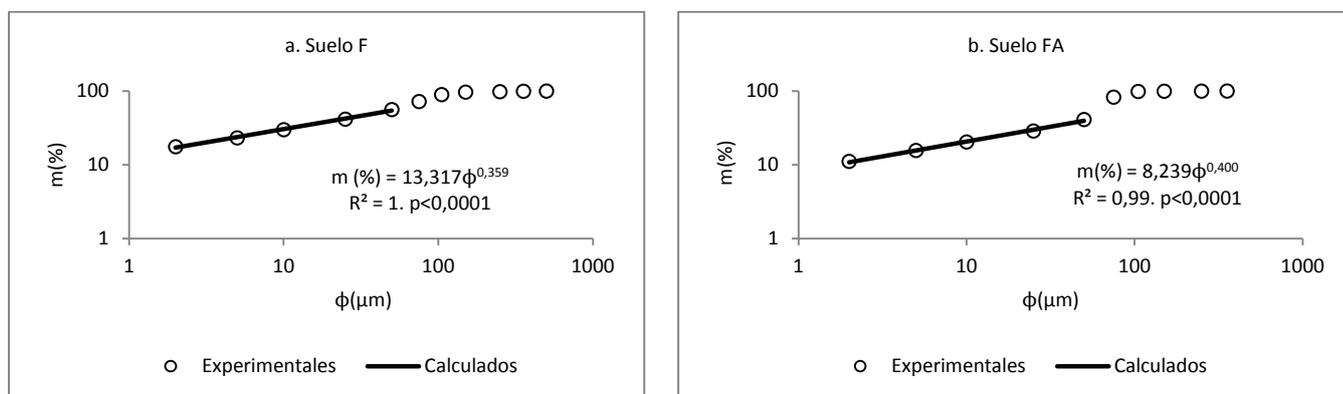
Donde  $m_p(\%)$  es la masa acumulada en porcentaje. C: constante del modelo fractal. D: dimensión fractal de fragmentación.  $\phi$ : diámetro máximo de la partícula en suspensión en ( $\mu\text{m}$ ) .

Se empleó Infostat (2016) para los análisis estadísticos de regresión lineal, ANOVA y test de Tukey.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El grupo de los suelos francos (F), contó con cinco suelos y el de los suelos franco arenosos (FA), seis. El modelo fractal ajustó para los suelos en el rango de 2 – 50  $\mu\text{m}$ , en los suelos F describió en promedio el 56,8% de la masa, mientras que los FA el 38,4 %. Los R<sup>2</sup> fueron elevados y los parámetros C y D significativos con  $p < 0,001$ . En la Tabla 1 se presentan los valores del modelo fractal para cada suelo y su significancia.

En la Fig. 1a y 1b se graficó un suelo típico de cada grupo, pueden observarse los datos experimentales de la DTP y los valores calculados por el modelo fractal. Dentro del rango ajustado, la DTP puede asociarse al modelo teórico y ser representado por la ecuación. En ambos grupos el modelo subvalora sistemáticamente las arenas, siendo más evidente en los suelos FA.



**Figura 1.** Ejemplo de curvas experimentales y calculadas con el modelo fractal, de masa acumulada en función del diámetro. a, suelo franco, b suelo franco arenoso. Los ejes se presentan en escala logarítmica.

**Tabla 1:** Suelos agrupados según la clase textural USDA

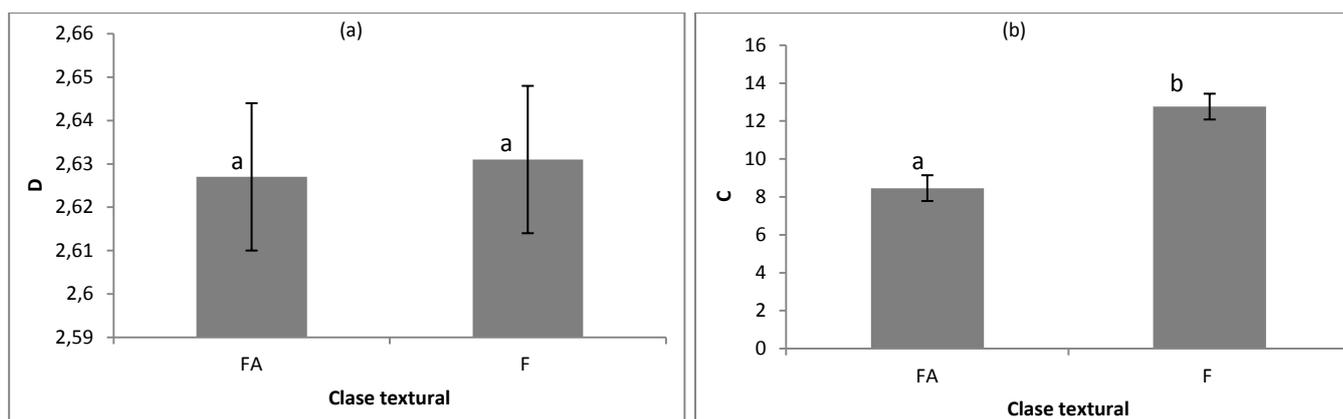
Grupo	arc %	$m_p$ (%)	$R^2$ Aj	C	D=3-b	p-valor C	p-valor D
F	14,8	53,6	0,97	10,349	2,601	0,0001	0,0015
F	16,6	54,6	0,99	12,274	2,631	<0,0001	0,0003
F	17,6	56,0	1,00	13,317	2,641	<0,0001	0,0001
F	18,0	57,8	0,99	13,571	2,642	<0,0001	0,0002
F	19,1	62,1	0,99	14,299	2,638	<0,0001	0,0003
FA	11,7	34,9	0,99	8,863	2,661	<0,0001	0,0004
FA	11,6	34,2	0,99	8,859	2,667	<0,0001	0,0004
FA	8,4	37,4	0,98	5,707	2,542	0,0003	0,0009
FA	14,6	42,7	0,93	10,375	2,666	0,0003	0,005
FA	11,9	40,2	0,99	8,716	2,625	<0,0001	0,0005
FA	11,1	41,1	0,99	8,239	2,600	<0,0001	0,0001

F: franco, FA: franco arenoso; arc %: porcentaje de arcilla;  $m_p$ : masa del suelo descripta por el modelo;  $R^2$  Aj: coeficiente  $R^2$  ajustado de la regresión; C: parámetro C del modelo fractal; D=3-b: dimensión fractal de fragmentación; p valor C: p valor del parámetro C y p valor del parámetro D. Todos los valores corresponden al ajuste del modelo fractal en el intervalo 2-50  $\mu$ m.

Se compararon entre grupos F y FA, los parámetros del modelo, las D no arrojaron diferencias,  $p=0,87$ , en cambio las C si se diferenciaron  $p=0,001$ . En la Fig 2 a y b se representaron los resultados de los anova respectivamente.

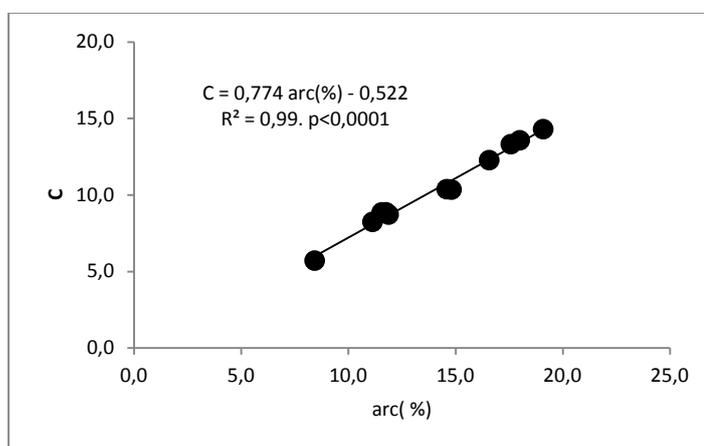
En la bibliografía es habitual referirse al parámetro D cuando se describe el modelo fractal. La D aumenta en suelos finos y disminuye en los gruesos. Teóricamente, los valores de dimensión fractal relativamente bajos indican que el suelo es dominado por partículas grandes, mientras que valores altos indican dominancia de partículas pequeñas (Valdez-Cepeda & Olivares –Saenz, 1998). Bartoli *et al.*, (1991) confirmaron que suelos de textura fina son bien caracterizados por una distribución fractal de las partículas mientras que los cuarzo arenosos no.

En este trabajo, se analizaron suelos de texturas intermedias y fue C el parámetro sensible que permitió diferenciar a los grupos.



**Figura 2.**(a). Dimensión fractal de fragmentación D, valores medios y errores. (b) Parámetro C del modelo fractal, valores medios y errores, letras diferentes indican diferencias significativas  $p=0,05$

Se ajustó una regresión lineal entre C y el porcentaje de arcilla para ambos grupos en conjunto, la misma obtuvo un  $p < 0,001$  para la pendiente, la ordenada al origen no fue significativa  $p=0,26$  y el  $R^2=0,99$ . La relación se representó en la Fig. 3.



**Figura 3.** Valores de C obtenidos del modelo fractal para cada suelo en función del porcentaje de arcilla y ecuación de regresión ajustada

Resultó beneficioso acotar los tamaños de partículas para los que se ajustó el modelo, como sugiere Bezaud *et al.*, 2015, fuera de los límites en los que se acotó el modelo, la extrapolación conduce a resultados equivocados sobre la DTP.

En estos suelos F - FA, el modelo describió a las partículas más finas, la presencia de arenas en tenores elevados, limitó el alcance.

## CONCLUSIONES

Los suelos francos y franco arenosos ajustaron al modelo fractal en el dominio 2-50  $\mu\text{m}$ . Las arenas no fueron descriptas adecuadamente. Si bien el modelo fractal no podría aplicarse a toda la masa del suelo, la posibilidad de acotarlo permitió modelar la DTP entre 2 y 50  $\mu\text{m}$ , brindando más información que los datos de textura. El contenido de arenas fue limitante para definir el alcance en la masa descripta por el modelo teórico.

En estos suelos pampeanos, el origen y las características de los materiales originales, así como la dinámica de transporte definirían si los mismos ajustan o no al modelo fractal.

La referencia única de la D, como parámetro de los suelos es una información incompleta que necesita del parámetro C para interpretar el escalamiento de las partículas.



## AGRADECIMIENTOS

Cátedra de Física Aplicada y Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

## BIBLIOGRAFÍA

- Avnir D; O Biham; D Lidar & O Malcai. 1998. Is the Geometry of Nature Fractal? *Science*, vol. 279 no. 5347 pp. 39-40.
- Bartoli F; R Philippy; M Doirisse; S Niquet & M Dubuit. 1991. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: The fractal approach. *J. Soil Sci.* 42:167-185.
- Behzad G & D Hugh; 2015. Fractal dimension of sil fragment mass-size distribution: A critical analysis. *Geoderma* 245-246, 98-103
- Bittelli M; GS Campbell & M Flury. 1999. Characterization of particle-size distribution in soil with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 782-788.
- Campbell G & S Shiozawa. 1992. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. University of California, Riverside., Ch. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data, pp. 317-328.
- Caruso T; EK Barto; MRK Siddiky; J Smigelski & MC Rillig. 2011. Are power laws that estimate fractal dimension a good descriptor of soil structure and its link to soil biological properties? *Soil Biology & Biochemistry* 43, 359-366.
- Filgueira RR; Ya Pachepsky & LL Fournier. 2003. Time-mass scaling in soil texture analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1703-1706. ISSN 0361-5995.
- Filgueira RR; PR Gelati; LL Fournier & GO Sarli. 2004. ¿Es la distribución de tamaño de partículas de un suelo siempre fractal?. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná Entre Ríos, Argentina.
- Filgueira RR, LL Fournier, GO Sarli & CG Soracco. 2005. Distribución de partículas y agregados de suelos: el modelo fractal. En: *Reología del suelo agrícola bajo tráfico*. Ed. D. Jorajuría Editorial de la Universidad de La Plata. EDULP. Pp. 21-38. ISBN 950-34-0334-0.
- Filgueira RR; LL Fournier; CI Cerisola; PR Gelati & MG García. 2006. Particle-size distribution in soils; a critical study of the fractal model validation. *Geoderma*, Volume 134, Issues 3-4, 327-334.
- Filgueira RR; PR Gelati; LL Fournier; GO Sarli & CG Soracco. 2009. Distribución de tamaño de partículas del suelo; su estudio con un modelo fractal. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
- Gee GW & Bauder. 1986. Particle size analysis. methods of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods. *Agronomy Monograph* N° 9. Second Edition. Pp. 383-411.
- Gelati PR; GO Sarli & RR Filgueira. 2016. Estudio fractal de la distribución de partículas y pseudopartículas en suelos de la pradera pampeana. *Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Rio Cuarto.
- Gonzalez Bonorino F. 1966. Soil clay mineralogy of the Pampa plains, Argentina. *Journal of Sedimentary Petrology* 36:1026-1035.
- Hyslip J & L Vallejo. 1997. Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. *Engineering Geology* 48, 231-244.
- InfoStat 2016. FCA-Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Korvin G. 1992. *Fractal Methods in the Earth Sciences*. Elsevier, Amsterdam. 191 p.
- Mandelbrot B. 1982. *The fractal geometry of nature*. W.h. Freeman and Company. New York.
- Millán H; M Gonzalez-Posada; M Aguilar; J Domínguez & L Céspedes. 2003. On the fractal scaling of soil data. Particle size distributions. *Geoderma* 117, 117-128.
- Perfect E; M Díaz Zorita & J Grove. 2002. A prefractal model for predicting soil fragment size distributions. *Soil and Tillage Research* 36,1-20.
- Stanchi S, E Bonifacio; E Zanini & Pa Pachepsky. 2006. Presence and prediction of fractal behaviour in particle-size distributions as affected by the sample pretreatment and soil properties. *Soil Sci.* 171 (4), 283-292.
- Stanchi S; E Bonifacio & E Zanini. 2008. Mass-size fractal dimension of primary and aggregate particles and soil profile development. *Soil Sci.* 173 (2), 87-95.
- Taguas F; M Martín & E Perfect. 1999. Simulation and testing of self-similar structures for soil particle size distributions using iterated function systems. *Geoderma* 88, 191 -203.



- Turcotte D L. 1986. Fractals and fragmentation. JGR. Vol. 91. No. B2. Pp. 1921-1926.
- Tyler SW & SW Wheatcraft. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 362–369.
- Valdez-Cepeda R D & E Olivares-Sáenz. 1998. Geometría fractal en la ciencia del suelo. Terra, 16(3) 277-288.
- Vdovic N; J Obhodas & K Pikelj. 2010. Resvisiting the particle-size distribution of soils: comparison of different methods and simple pre-treatments. European Journal of Soil Science, 61, 854-864.