



XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Suelos... Huellas del pasado, desafíos del futuro

San Fernando del Valle de Catamarca,
Prov. de Catamarca, Argentina
21 al 24 de mayo de 2024



MODELO FRACTAL APLICADO A ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE SUELOS

Gelati, P. R.¹, Machetti, N. E.¹, Pellegrini, A. E.¹, Iturre, J., Frías Calvo, A.¹ y Ursino, M.¹

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales – UNLP
Av. 60 y 119, (1190) La Plata, Provincia de Buenos Aires.
prgelati@gmail.com

RESUMEN: La distribución del tamaño de partículas (DTP), es una de las características más estables en un suelo y está relacionada con otras propiedades físicas, químicas y de manejo. Se utiliza también como insumo en la estimación de propiedades hidrológicas, a través de las funciones de transferencia edafológica. La geometría fractal se ha empleado para estudiar la DTP y su relación con los procesos formadores. Un objeto fractal está compuesto por una cantidad de estructuras similares superpuestas. Se trabajó bajo la hipótesis que los suelos pampeanos tienen DTP de tipo fractal. Fueron objetivos obtener las DTP de suelos con texturas contrastantes, obtener experimentalmente el modelo fractal, la constante de proporcionalidad (C) y la dimensión fractal de fragmentación (D) y compararlos con los obtenidos en forma teórica a partir de los porcentajes de arena y arcilla (Cc y Dc) Se analizaron 18 muestras superficiales de suelos, seis de Saladillo, doce de Bavio y cuatro de Vieytes Se realizaron sedimentaciones por el método de la pipeta. Los resultados separaron a los suelos en dos grupos, los franco-limosos (FL) y los francos arenosos (FA) Los ajustes de los datos experimentales al modelo fueron elevados ($p > 0,98$) y significativos ($p < 0,0001$) Los FL fueron descritos por un modelo fractal, mientras que los FA, necesitaron por lo menos dos. El modelo fractal obtenido de manera experimental se contrastó con el calculado a partir de los datos de arena y arcilla. El anova no mostró diferencias entre los valores de C y Cc ($p = 0,96$) ni D y Dc ($p = 0,79$). Se concluye que la DTP de los suelos estudiados es fractal, permitiendo estimar la DTP a partir de la textura. El modelo propuesto podría suministrar información a funciones de transferencia edafológica. Estos estudios básicos, de la naturaleza de la distribución de tamaño de partículas, podría ampliarse a otras regiones del país.

PALABRAS CLAVE: granulometría, partículas, textura.

INTRODUCCION

La distribución del tamaño de partículas (DTP), es una de las características más estables en un suelo y está relacionada con otras propiedades físicas, químicas y de manejo. (Arya y Paris, 1981; Campbell y Shiozawa, 1992; Vdovic et al. 2010). Se utiliza también como insumo en la estimación teórica de propiedades hidrológicas, a través de las funciones de transferencia edafológica (Pachepsky y Rawls, 2004).

La geometría fractal se ha empleado para estudiar la distribución de tamaño de partículas y su relación con los procesos formadores (Tyler y Wheatcraft, 1992; Hyslip y Vallejo, 1997; Bittelli *et al.*, 1999; Taguas *et al.*, 1999; Perfect *et al.*, 2002; Millán *et al.*, 2003; Stanchi *et al.*, 2008; Filgueira *et al.*, 2006, 2009; Gelati *et al.*, 2019, 2022; Gelati, 2020).

Un objeto fractal está compuesto de una cantidad de estructuras similares superpuestas, visibles a cualquier nivel de detalle, a esta característica se la conoce como autosimilitud. El material, se distribuye en forma heterogénea, pero no al azar. Matemáticamente, la autosimilitud se puede modelizar con una relación potencial (Mandelbrot, 1982; Turcotte,



1986). El modelo propuesto por Tyler y Wheatcraft, (1992) y expresado en función del diámetro de partículas es el siguiente:

$$\frac{m_p}{m_T} = \left(\frac{\phi_p}{\phi_T}\right)^{3-D} \quad \therefore m_p = C \phi_p^{(3-D)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde m_p es la masa acumulada hasta el diámetro ϕ_p , m_T es la masa total con comportamiento fractal hasta el diámetro ϕ_T . C es la constante de proporcionalidad del modelo fractal, mientras que D es la dimensión fractal de fragmentación, la que describe el escalamiento. Estos valores se obtienen por regresión de la DTP en función del diámetro de partículas.

Los parámetros C y D pueden calcularse a partir de los datos texturales de arena y arcilla (Gelati, 2020)

$$D = 3 - \frac{\text{Log} \frac{m_{arc}}{(100-m_A)}}{\text{Log} \frac{2}{50}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$C = m_{arc} 2^{D-3} \quad \text{Ecuación 3}$$

Estas ecuaciones permiten calcular la DTP de un suelo, a partir de los datos texturales, siempre y cuando la naturaleza de la DTP sea de tipo fractal

Se trabajó bajo la hipótesis que los suelos pampeanos tienen distribución de tamaño de partículas de tipo fractal. Fueron objetivos obtener las distribuciones de tamaño de partículas de suelos con texturas contrastantes, obtener experimentalmente los modelos fractales y compararlos con los obtenidos en forma teórica a partir de los porcentajes de arena y arcilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras superficiales compuestas de 0 – 15 cm, las mismas fueron secadas, desagregadas y tamizadas por 2 mm. Las muestras de Saladillo (seis) pertenecen a un establecimiento privado, mientras que las de Bavio (ocho) y Vieytes (cuatro), pertenecen a los campos experimentales de Don Joaquín y El Amanecer de la FCAYF - UNLP, respectivamente.

Las DTP se obtuvieron por el método de la pipeta (Gee & Bauder, 1986). Sobre las muestras de Saladillo, en las sedimentaciones, se extrajeron alícuotas a los tiempos correspondientes para obtener: 50, 40, 30, 20, 10, 5 y 2 μm . El tamizado de arenas se realizó con tamices de aberturas: 1000, 500, 250, 105, 88, 75, 62 y 53 μm . Para las muestras de Bavio y Vieytes se extrajeron alícuotas a los tiempos necesarios para obtener: 50, 35, 20, 10, 5 y 2 μm . El tamizado de arenas se realizó con tamices de aberturas de 500, 250, 105, 75 y 53 μm . Con las masas acumuladas en función de los diámetros aparentes se estimaron los parámetros C, y D del modelo fractal (experimental). Empleando las Ecuaciones 2 y 3 se calcularon los parámetros fractales que denominaremos C_c y D_c , para diferenciarlos de los obtenidos experimentalmente.

Los análisis de regresión se realizaron por el método de mínimos cuadrados. Se emplearon los coeficientes de correlación para evaluar el grado de asociación entre resultados del modelo fractal con datos experimentales. Para la comparación entre parámetros fractales calculados y experimentales se aplicó el modelo de análisis de la varianza.

Los análisis se realizaron con el software estadístico Infostat 2020, versión libre (Di Rienzo *et al.*, 2020)

RESULTADOS Y DISCUSION

Distribución de tamaño de partículas

Los suelos fueron divididos en dos grupos, el de los franco-limosos (FL) y el de los franco-arenosos (FA).

El grupo de los FL está integrado por doce muestras de suelos franco-limosos (FL) y franco arcillo limosos (FaL) extraídas de las localidades de Bavio y Vieytes, en promedio contienen 3,5 % de arenas, 70,2 % de limos y el 26,3 % de arcillas, que le confiere una clase textural media FL. La fracción principal de arena es de tipo muy fina. En La Figura 1A, se presentan las DTP, previa transformación logarítmica de la masa acumulada y el diámetro. En la gráfica se observan dos sectores diferentes, el primero con pendiente pronunciada y el segundo con pendiente no distinta de cero.

El grupo de los suelos FA, se formó con las seis muestras provenientes de Saladillo. Este grupo, tuvo valores promedio de arena de 53,1 %, limo 34,0 % y 12,9% de arcillas, siendo la clase textural media FA. Las arenas pertenecen principalmente al tipo muy finas y finas. Las DTP evidencian más de un sector con pendiente, pueden identificarse dos o tres, según el suelo.

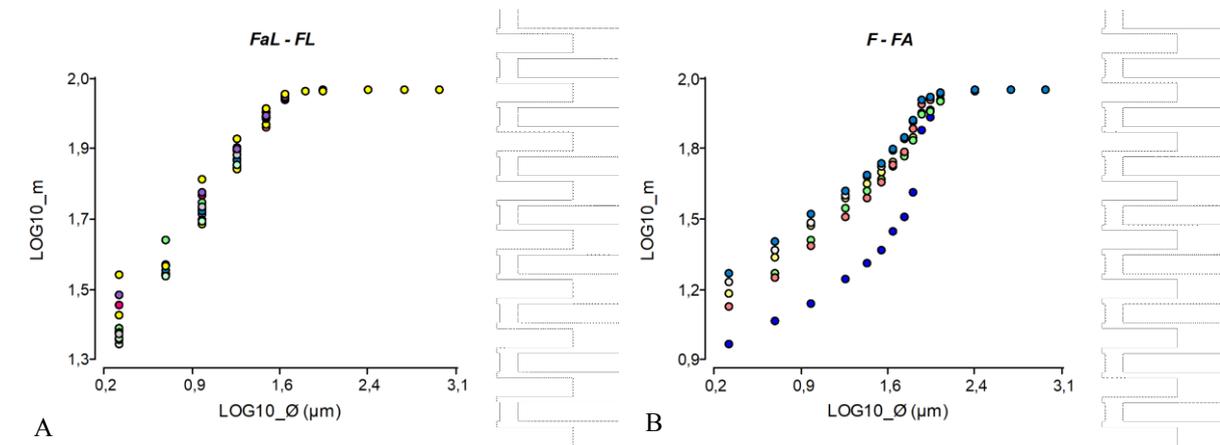


Figura 1. Distribución de tamaño de partículas de masa acumulada en función del diámetro ϕ (μm). A. DTP característica de suelos franco-limosos se observan dos pendientes por suelo. B. DTP característica de suelos más franco-arenosos, se observan tres o cuatro pendientes por suelo.

Modelo fractal

Los resultados texturales y el modelo fractal para suelo se detalla en la Tabla 1. En todos los casos los datos experimentales ajustaron de manera significativa ($p < 0,0001$) al modelo fractal y con elevados coeficientes de correlación ($R^2 > 0,98$).

En el grupo de suelos FL un modelo fue suficiente para describir la DTP hasta un 97% de la masa acumulada. En la Figura 2A, se presenta como ejemplo un suelo, indicando los valores experimentales y el modelo fractal obtenido.

En el grupo de suelos FA, se requiere más de un modelo fractal para describir el 50 % de la masa acumulada. Se analizó el modelo que describe las fracciones más finas (Tabla 1). Este modelo, en la Figura 2B, está representado por el modelo fractal 1 (MF1), sin embargo, el nivel de detalle permitió reconocer hasta tres sectores con distribución de tipo fractal (Figura 2B).

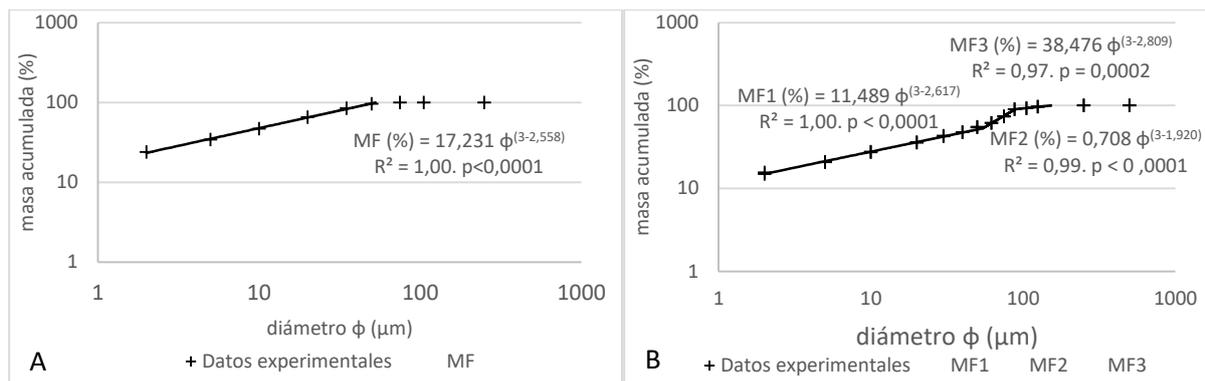


Figura 2. A. Valores experimentales de la DTP de masa acumulada en función del diámetro ϕ (μm). DTP característica de suelos FL y un modelo fractal que describe más del 95% de la masa acumulada, las arenas tienen $D=3$. B. DTP característica de suelos FA, con tres sectores fractales.

La complejidad de estos suelos, que necesita más de un modelo para describirlos o fractalidad intermedia, es atribuible al al proceso de transporte y depósito del material original, los cuales fueron abordados por (González Bonorino, 1966; Morrás & Cruzate, 2000). En Gelati *et al.*, (2022) se propone un enfoque fractal al proceso de transporte - depósito y las DTP esperables de este proceso.

Tabla 1. Procedencia de los suelos analizados SAL, Saladillo, BAV, Bavio y VIEY, Vieytes. Arena (A %), limo (L %) y arcilla (arc %), Clase textural (USDA): F: franco; FA franco arenoso, FL, franco limoso, FaL, franco arcillo limoso. R^2 , coeficiente de ajuste entre los datos experimentales y el modelo fractal. Significancia del ajuste (p-valor) entre el modelo fractal y los datos experimentales. Modelo fractal experimental, constante de proporcionalidad (C), dimensión fractal de fragmentación (D). Modelo fractal calculado a partir de los valores texturales de arena y arcilla (C_c , D_c).

Lugar	(%)			C T USDA	R^2	p-valor	C	D	C_c	D_c
	A	L	arc							
SAL	74,9	16,8	8,3	FA	0,98	<0,0001	6,479	2,696	6,551	2,657
SAL	50,4	36,1	13,5	F	1,00	<0,0001	10,423	2,602	10,200	2,596
SAL	52,5	35,5	12,0	F-FA	1,00	<0,0001	8,622	2,568	8,926	2,573
SAL	44,9	39,8	15,3	F	1,00	<0,0001	11,489	2,617	11,577	2,601
SAL	51,9	36,1	12,0	F-FA	1,00	<0,0001	8,680	2,593	8,939	2,570
SAL	43,8	39,6	16,6	F	1,00	<0,0001	12,656	2,631	12,730	2,621
BAV	2,9	72,1	25,1	FL	1,00	<0,0001	18,681	2,574	18,729	2,579
BAV	3,0	73,2	23,8	FaL	1,00	<0,0001	17,350	2,554	17,616	2,564
BAV	2,7	71,8	25,4	FL	0,99	<0,0001	20,235	2,588	19,035	2,583
BAV	3,0	73,8	23,2	FL	1,00	<0,0001	17,077	2,549	17,067	2,556
BAV	5,5	70,7	23,8	FL	1,00	<0,0001	17,470	2,568	17,730	2,572
BAV	3,7	71,5	24,8	FL	1,00	<0,0001	18,281	2,571	18,502	2,578
BAV	4,7	67,8	27,5	FL	0,99	<0,0001	19,939	2,608	21,047	2,614
BAV	3,5	72,6	23,9	FL	1,00	<0,0001	17,231	2,558	17,739	2,567
VIEY	4,3	72,7	23,0	FL	1,00	<0,0001	18,772	2,575	16,932	2,557
VIEY	3,2	67,7	29,1	FaL	1,00	<0,0001	22,600	2,621	22,458	2,627
VIEY	3,7	65,6	30,7	FaL	1,00	<0,0001	24,143	2,643	24,004	2,645
VIEY	2,1	63,2	34,7	FaL	1,00	<0,0001	27,900	2,673	27,746	2,678

Modelo fractal experimental y modelo fractal calculado

En la Tabla 1, se presentan los parámetros C_c y D_c , obtenidos con las ecuaciones 2 y 3. Los mismos fueron contrastados con sus pares experimentales. El anova para $C - C_c$ y $D - D_c$, indicó que las medias no son significativamente diferentes ($p=0,96$) y ($p=0,79$). Estos valores medios se muestran en la Figura 3.

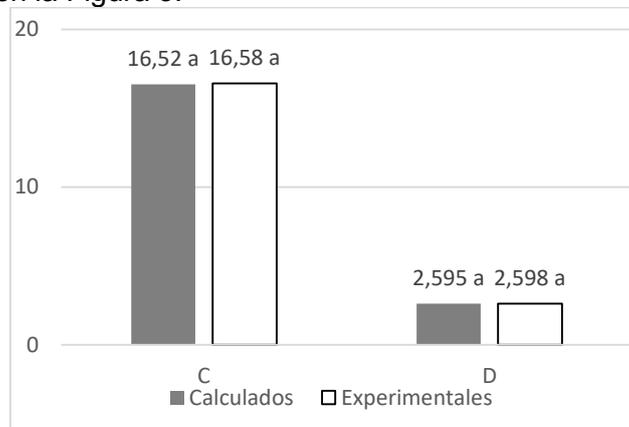


Figura 3. Valores medios de C y D del anova. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

En estos suelos de la Pradera Pampeana en los que la DTP es descrita por el modelo fractal, este modelo calculado en función de los porcentajes de arena y arcilla, podría emplearse para estimar la DTP de un suelo. La veracidad de las predicciones dependerá de la calidad de los datos texturales (protocolos y metodologías).

En el caso de los suelos franco y franco-arenosos, es necesario conocer los dos o tres modelos fractales que ajustan a la DTP. Si bien el modelo calculado no se diferencia del experimental no se tiene certeza cual es porcentaje de la DTP que se está describiendo.

Estos resultados sugieren continuar trabajando con mayor número de suelos abarcando más y diferentes DTP de clases texturales franco, franco arenoso y areno franco para mejorar la calidad de las predicciones.

CONCLUSIONES

Se concluye que la distribución de tamaño de partículas de los suelos estudiados es de naturaleza fractal. Esta información permite estimar la distribución de tamaño de partículas a partir de la textura. El modelo propuesto puede suministrar información a las funciones de transferencia edafológica.

Estos estudios básicos, de la naturaleza de la distribución de tamaño de partículas, podría ampliarse a otras regiones del país.

AGRADECIMIENTOS

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales UNLP
A los campos experimentales de Don Joaquín y El Amanecer
Cátedras de Edafología y Física Aplicada

BIBLIOGRAFIA

- Arya, L.M. y Paris, J.F. (1981). A physico-empirical model to predict the soil mixture characteristic curve from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1023-1030.
- Bittelli, M., Campbell, G.S. y Flury, M. (1999). Characterization of particle-size distribution in soil with a fragmentation model. *Soil Sci Soc Am J.* 63:782-788.

- Campbell, G. y Shiozawa, S. (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.
- Di Rienzo J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. InfoStat versión (2020). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Filgueira, R.R., Fournier L.L., Cerisola, C.I., Gelati, P.R. y García M.G. (2006). Particle-size distribution in soils; a critical study of the fractal model validation. *Geoderma*, Volume 134, Issues 3-4, 327-334.
- Filgueira, R.R., Gelati P.R., Fournier L.L., Sarli G.O. y Soracco, C.G. (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, G.W. y Bauder J.W. (1986). Particle size analysis. *Methods of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph N° 9. Second Edition.* Pp. 383-411.
- Gelati, P.R., Sarli, G.O., Lozano, L.A. y Filgueira, R.R. (2019). Estudio fractal de la distribución de partículas y pseudopartículas en suelos de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 37 (1): 147-157, 2019
- Gelati, P.R. (2020). Distribución del tamaño de partículas y microagregados en suelos de la Pradera Pampeana: estudio mediante la geometría fractal. Tesis doctoral, UNLP, Pcia. de Buenos Aires, Argentina: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/102199>
- Gelati P.R., Machetti, N. E., Sarli, G.O. y Filgueira, R.R. (2022). Modelo fractal aplicado al proceso de transporte y depósito en suelos de la pradera pampeana. *Actas XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* CABA, Argentina.
- Hyslip, J. y Vallejo, L. (1997). Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. *Engineering Geology* 48, 231-244.
- Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature.* W.h. Freeman and Company. New York.
- Millán, H., Gonzalez-Posada, M., Aguilar, M., Domínguez, J. y Céspedes, L. (2003). On the fractal scaling of soil data. *Particle size distributions. Geoderma* 117, 117-128.
- Pachepsky, Y. y Rawls, J.M. (2004). *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Development in Soil Science (Vol 30).* Amsterdam. The Netherlands. 504 p.
- Perfect, E., Díaz Zorita, M. y Grove, J. (2002). A prefractal model for predicting soil fragment size distributions. *Soil and Tillage Research* 36:1-20.
- Stanchi, S., Bonifacio, E. y Zanini, E. (2008). Mass-size fractal dimension of primary and aggregate particles and soil profile development. *Soil Sci.* 173 (2), 87-95.
- Taguas, F. Martín, M y Perfect, E. (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, S.W. y Wheatcraft, S.W. (1992). Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 362-369.
- Vdovic, N. Obhodas, J. y Pikelj, K. (2010). Revisiting the particle-size distribution of soils: comparison of different methods and simple pre-treatments. *Eur J Soil Sci.* 61, 854-864.