

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**



**Trabajo Final de Carrera de Ingeniería Agronómica.**

**Investigación**

**“Estudio fractal de la distribución de tamaños de partículas y pseudopartículas en suelos de la Estación Experimental Julio A. Hirschhorn”**

Alumnos: **Augusto Gonzalez Prates**

Legajo: 27411/1

Email: [agonzalezprates@hotmail.com](mailto:agonzalezprates@hotmail.com)

DNI: 38669246

Teléfono: 221 4082313

**Matías Zaccaro**

Legajo: 27409/8

Email: [matipr68@gmail.com](mailto:matipr68@gmail.com)

DNI: 38351519

Teléfono: 2346 619397

Director: Dr. Pablo R. Gelati

Co-director: Ing. Agr. Andrea E. Pellegrini

Diciembre 2020

Índice

i.	<b>Introducción</b> .....	4
	El modelo Fractal.....	5
	Objetivo general.....	7
	Objetivos específicos.....	8
ii.	<b>Materiales</b> .....	y
	<b>métodos</b> .....	8
	Estación Experimental Ing. Agr. Julio Hirschhörn, FCAYF – UNLP.....	8
	Con Materia Orgánica. Pretratamiento con materia orgánica.....	10
	Textura aparente.....	12
iii.	<b>Resultados</b> .....	y
	<b>discusión</b> .....	13
	Distrib. de tamaño de partículas y modelo fractal para los suelos SMO.....	13
	Distribuciones de tamaño de microagregados.....	17
	Microestructuración: cuantificación.....	20

Modelo	fractal	SMO	vs
CMO.....			21
iv.	<b>Conclusiones</b> .....		22
v.	<b>Bibliografía</b> .....		23
vi.	<b>Apéndice</b>	<b>de</b>	<b>tablas</b>
	<b>figuras</b> .....		<b>y</b>
			27

## RESUMEN

El análisis de tamaño de partículas se utiliza a menudo en la ciencia del suelo para evaluar la textura, como resultado se obtienen los contenidos de arena, limo y arcilla, y con estos, empleando un triángulo textural, se obtiene la clase textural. Los resultados del análisis textural dependen de los pretratamientos realizados. Se hipotetizó que la distribución de tamaño de partículas de los suelos de la Estación Experimental Julio A. Hirschhörn son de tipo fractal. Se evaluó experimentalmente las distribuciones de tamaño de partículas (DTP) y microagregados (DTM). Se determinaron las diferentes fracciones del suelo sin Materia Orgánica (SMO) y con materia orgánica (CMO), textura aparente y la cuantificación de la microestructuración. En los suelos analizados SMO, el modelo fractal resultó el marco teórico adecuado para obtener la distribución de tamaño de partículas de los suelos estudiados entre 2 y 56  $\mu\text{m}$ . En el proceso de micro estructuración en suelos CMO, las partículas de tamaño arcilla y limo se agregan formando microagregados de tamaño arena. El modelo fractal también resultó ser el marco teórico adecuado para obtener la distribución de tamaño de microagregados entre 2 y 100  $\mu\text{m}$ , aunque el ajuste resultó menor que con el tratamiento SMO. La masa de suelo CMO descrita en todos los casos resultó menor que la obtenida con el tratamiento SMO. En los tres suelos a las dos profundidades analizados con CMO se observó un incremento de la fracción de tamaño arena y una disminución de las fracciones de tamaño limo y arcilla respecto al tratamiento SMO.

**PALABRAS CLAVE:** Textura, fragmentación, modelo fractal.

## I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema trifásico compuesto por una fracción sólida, una líquida y una gaseosa, estas últimas dos comprendidas en los poros. El mismo es una capa muy delgada del diámetro de la tierra, que se ha formado muy lentamente a través de los siglos, Holoceno del Cuaternario, (Lanfranco *et al.* 2014) con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura, el viento y la acción de los seres vivos sobre esta. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo (FAO, 1996). El arreglo de los sólidos permite la formación de poros donde se aloja el aire y el agua.

La distribución de tamaño de partículas (DTP) minerales que forman el suelo, es una de las características más estables del mismo. 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, conductividad hidráulica saturada e insaturada, entre otras (Campbell & Shiozawa, 1992; Vdovic *et al.* 2010).

La textura se refiere al contenido porcentual de arena, limo y arcilla, en el suelo. Existen diferentes escalas para los tamaños de partículas, adoptaremos la definida por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA):

Arenas: partículas comprendidas entre 2000 y 50 micrómetros.

Limos: partículas comprendidas entre 50 y 2 micrómetros.

Arcillas: partículas de un tamaño menor a 2 micrómetros.

## **El modelo Fractal:**

La geometría fractal ha permitido describir teóricamente estructuras que se observan en la naturaleza (Mandelbrot, 1982). Es así que las características geométricas de la distribución espacial de las raíces, las longitudes de las costas - fronteras, el fraccionamiento de una roca y la distribución de tamaño de partículas en el suelo, entre otros, pueden ser idealizados satisfactoriamente mediante esta teoría (Korvin G., 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. Sin embargo, 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 (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; Filgueira *et al.* 2003, 2005, 2006 2009).

El modelo fractal estuvo propuesto inicialmente para número de partículas, es así que la asociación con cuerpos geométricos regulares llevaba a obtener valores de la dimensión fractal de fragmentación mayor a tres, lo que carece de sentido físico. Tyler & Wheatcraft (1992) plantearon estudiar directamente la masa de partículas, en cambio del número de ellas. Esto conlleva ventajas, pues es experimentalmente más sencillo y preciso obtener fracciones de masa que número de partículas. En el modelo propuesto por Tyler & Wheatcraft (1992), la fracción de masa acumulada de un radio menor que un valor R es:

$$\frac{M(r)}{M_T} = 1 - \frac{M(r)}{M_T} = \left( \frac{R}{R_{Lsup}} \right)^{3-D} = CR^{3-D} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde  $M_T$  es la masa total de la distribución de las partículas,  $r = R_{Lsup}$  es un límite superior de tamaño para el comportamiento fractal, "C" es una constante de proporcionalidad y D es la dimensión fractal de fragmentación. Este modelo resultó más razonable desde el punto de vista físico, con resultados de D siempre menores que 3. Una D próxima o igual a 3 implica una distribución euclidiana, por lo tanto, no fractal.

Este modelo puede expresarse en función del diámetro que queda definido de la siguiente manera:

$$\frac{M_p}{M_T} = \left( \frac{\phi_p}{\phi_M} \right)^{3-D} \quad \therefore M_p = \frac{M_T}{(\phi_M)^{3-D}} (\phi_p)^{3-D} = C \phi_p^{3-D} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

La nomenclatura es similar a la anterior, coincidiendo  $M_T$ , C y D, mientras que,  $M_p$  es la masa parcial acumulada hasta el tamaño  $\phi_p$  ( $\mu\text{m}$ ) y  $\phi_M$  ( $\mu\text{m}$ ) es el diámetro máximo hasta donde alcanza un comportamiento fractal distribución de tamaño de partículas o distribución de tamaño de microagregados. La distribución de tamaño de partículas se define como el

porcentaje relativo de los granos de cada una de las distintas fracciones de tamaños representadas en una muestra (Perry & Green, 2001) y puede representarse en forma de masa acumulada (%) en función al diámetro aparente ( $\mu\text{m}$ ).

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; 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 cuarzos arenosos no. Behzad *et al.* (2015), plantearon enfáticamente la necesidad de limitar el rango al tamaño de partículas para el cual el modelo fractal fue ajustado.

Gee & Bauder (1986) describe que suelos finos altamente estructurados se comportan como suelos gruesos. Gelati *et al.* (2019) encontraron en suelos de diferentes clases texturales, que por efecto de la materia orgánica las partículas de arcilla y limo se agregan incrementando la cantidad de microagregados tamaño arena.

## **Hipótesis**

La distribución de tamaño de partículas y pseudopartículas superficiales y subsuperficiales de los suelos de la estación experimental es de tipo fractal.

## **Objetivo general**

Evaluar experimentalmente las distribuciones de tamaño de partículas (DTP) y microagregados (DTM) de los suelos pertenecientes a las series Arroz, Bombeador y Centeno, superficiales y subsuperficiales.

## **Objetivos específicos**

Realizar las distribuciones de tamaño de partículas de los suelos en estudio

Realizar las distribuciones de tamaño de microagregados

Cuantificar el carbono orgánico total

Estimar los parámetros fractales C y D para las DTP

Estimar los parámetros C y D para las DTM

Cuantificar el efecto microestructurante de la materia orgánica en los horizontes superficiales y subsuperficial.

## **II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Muestreo de los suelos**

Estación Experimental Ing. Agr. Julio Hirschhörn, FCAyF - UNLP

El predio fundado en 1929 cuenta con 64 has y se encuentra delimitado por las siguientes calles: frente Av.66, laterales calles 167 y 173 y fondo Av.72, en los Hornos, en la periferia de la ciudad de La Plata. Los suelos de la Estación Experimental fueron relevados por Lanfranco y Carrizo, (1987). Se obtuvieron muestras compuestas superficiales (0- 15 cm) y subsuperficiales (15 – 30 cm) correspondientes a las series Arroz, Bombeador y Centeno.

### **Tratamiento de las muestras y determinaciones analíticas**

Las muestras fueron secadas en estufa a 40°C, con circulación forzada de aire, desagregadas, etiquetadas y envasadas para su posterior análisis

### **Carbono orgánico total**

El carbono orgánico total (COT) es una de las caracterizaciones habituales de los suelos, pues interviene en los procesos físicos, físico químicos y químicos del suelo. Algunas de las propiedades físicas relacionadas con la materia orgánica son el color, la estructura, la adsorción, retención y permeabilidad del agua. Al mismo tiempo, la dinámica de la biomasa edáfica se ve afectada por el nivel y calidad del mencionado componente orgánico.

La determinación de Carbono Orgánico Total (COT) se realizó mediante Walkley & Black, micrométodo (SAMPLA, 2004). El método se basa en la oxidación del carbono con una mezcla de  $K_2Cr_2O_7$  ayudado con el  $H_2SO_4$  concentrado, el exceso de dicromato se titula con reductor ferroso. Este método no oxida completamente a la materia orgánica. Walkley & Black (1934) propusieron un factor de corrección de 1,3, basado en una oxidación promedio del 77%, aceptado universalmente. Actualmente, se conoce que la oxidación varía desde 60 a 86%. En nuestro país, Richter *et al.* (1975), determinaron, sobre suelos de la pradera pampeana, una oxidación promedio del 82%, siendo entonces el factor de corrección 1,2, en lugar de 1,3, en esos suelos. Por lo tanto, se considera que este método da una aproximación semicuantitativa del C orgánico debido a la falta de un factor ajustado para cada suelo analizado. No obstante, en los análisis de rutina es ampliamente utilizado por sus ventajas de sencillez, rapidez y economía.

### **Sedimentaciones**

Se realizaron en probetas de 1000 mL con agua destilada y dos pretratamientos, todas las determinaciones se hicieron por duplicado:

#### **Sin Materia Orgánica. Pretratamiento tradicional de pipeta.**

Se realizó siguiendo el protocolo del método de la pipeta de Robinson (Gee & Bauder, 1986). Se lo consideró como el pretratamiento de máxima dispersión.

Se eliminó la materia orgánica con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y calor.

Sobre la muestra seca y sin materia orgánica (SMO), se agregó NaOH, 1 N como dispersante químico a razón de 5 mL por muestra, se dejó en reposo 14 h y luego se realizó la dispersión mecánica en agitador rotativo con esferitas de vidrio durante 18 h.

Luego de la dispersión mecánica, se extrajeron las arenas mediante un tamiz N° 270 (53  $\mu\text{m}$ ) y se recolectaron las suspensiones en probetas. Las probetas preparadas con la suspensión dispersa y enrasada con agua destilada fueron agitadas con un émbolo y se realizaron las extracciones a los tiempos establecidos en la Tabla 1, donde se presentan los tiempos calculados con la ecuación de Stokes para los diámetros aparentes evaluados en función de la profundidad de extracción y a 20 °C.

#### **Con Materia Orgánica. Pretratamiento con materia orgánica.**

Se pesó la masa de suelo seco, con materia orgánica (CMO).

En una probeta de 1000 mL se agregó agua destilada para humectar la muestra de suelo, se dejó en reposo por cinco minutos y luego se enrasó con agua destilada hasta en 1000 mL, inmediatamente se hicieron las extracciones a los tiempos previstos, (Tabla 1).

Los cálculos de las masas acumuladas en porcentaje se realizaron como indica la Ecuación 3.

$$\text{masa acumulada (\%)} < \phi = \frac{M_S V_{\text{probeta}}}{M_T V_{\text{pipeta}}} 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$M_S$  (g): masa seca obtenida para el diámetro (100, 50, 40,20,10, 5 y 2  $\mu\text{m}$ ).

$M_T$  (g): masa total inicial, pesada al iniciar el ensayo

$V$  probeta: volumen de la probeta, 1000 mL

V pipeta: volumen de la pipeta de aforo simple, 25 mL

Para calcular el tiempo de extracción de un diámetro aparente  $\phi_i$ , se empleó la ecuación de Stokes, que contempla la viscosidad de la suspensión, profundidad de extracción de la muestra y la densidad real de partículas, considerada  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ .

$$\Delta t = \frac{18 \times \Delta y \times \eta}{g \times \phi^2 \times (\delta_c - \delta_f)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$\Delta t$ = tiempo en segundos (s)

$\Delta y$ = profundidad de extracción de la muestra mediante una pipeta (cm)

$\eta$ = coeficiente de viscosidad ( $\text{din s cm}^{-2}$ )

$g$ = aceleración de la gravedad ( $\text{cm s}^{-2}$ )

$\phi$ = diámetro aparente (cm)

$\delta_c$ = densidad real de partículas ( $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ )

$\delta_f$ = densidad del fluido ( $1,00 \text{ g cm}^{-3}$ )

Para clasificación de los tamaños de partículas se empleó el criterio de USDA, mencionado en la Introducción general.

Puesto que la viscosidad es función de la temperatura, en el laboratorio se midió la “temperatura de la suspensión” como insumo para estimar su viscosidad en cada medición.

## Textura aparente

Fue definida como los porcentajes de las fracciones de los tamaños arena, limo y arcilla, cuando la muestra sedimentó en las condiciones del pretratamiento CMO.

Arena aparente ( $A_{ap}$ ): fracción comprendida entre  $50 < \phi (\mu\text{m}) < 2000$ . El porcentaje se obtuvo por diferencia como se indica:

$$A_{ap}(\%) = 100 - (L + arc)_{ap} \quad \text{Ecuación 5}$$

Limo aparente ( $L_{ap}$ ): fracción comprendida entre  $2 < \phi (\mu\text{m}) < 50$ . El porcentaje se obtuvo como se indica:

$$L_{ap}(\%) = (L + arc)_{ap} - arc_{ap} \quad \text{Ecuación 6}$$

Arcilla aparente ( $arc_{ap}$ ): fracción en porcentaje  $\phi (\mu\text{m}) < 2 \mu\text{m}$ .

## Microestructuración: cuantificación

Se compararon directamente los porcentajes de cada fracción y su par aparente. Relaciones entre las fracciones sin materia orgánica y con materia orgánica

Se realizó el cociente entre el porcentaje real de partículas (SMO) y el porcentaje aparente (CMO). Esta relación permite cuantificar el efecto microestructurante de la MO.

$$\text{Relación Arenas} = \frac{\text{Arenas (\%)}}{\text{Arenas aparentes (\%)}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{Relación Limos} = \frac{\text{Limos (\%)}}{\text{Limos aparentes (\%)}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Relación arcillas} = \frac{\text{arcillas (\%)}}{\text{arcillas aparentes (\%)}} \quad \text{Ecuación 9}$$

### **Análisis estadístico**

A los resultados experimentales se les aplicó el modelo de análisis de la varianza y cuando se detectaron diferencias significativas las medias se separaron mediante un test de Tuckey ( $p < 0,05$ ), previo al análisis de los datos se realizaron las pruebas de homogeneidad de las varianzas y normalidad.

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.

Los análisis estadísticos fueron realizados empleando el software estadístico Infostat 2018 (Di Rienzo *et al.* 2018).

### **III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las muestras de suelo superficiales correspondieron a clases texturales franco arcillo limoso y franco limoso. El contenido de COT en los primeros 15 cm para la serie Arroz fue muy bien provisto, para la serie Bombeador moderadamente provisto y para la serie Centeno bien provisto. Los valores se presentan en la Tabla 2. Las muestras subsuperficiales (Tabla 3) presentaron las mismas clases texturales que las superficiales.

#### **Distribución de tamaño de partículas y modelo fractal para los suelos SMO analizados**

- **Serie Arroz**

Horizonte Superficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 46 micrómetros en el horizonte superficial, (Figura 1 a), con un  $R^2$  de 0,993 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 99,5 de la masa del suelo, el resto del material presenta una DTP no fractal puesto que la D es muy próxima a 3.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 24,789. x^{0,363} \quad D = 2,636$$

$$R^2 = 0,993. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 46$$

#### Horizonte Subsuperficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 47 micrómetros en el horizonte Subsuperficial, (Figura 1 b) con un  $R^2$  de 0,994 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 99,1% de la masa del suelo, el resto del material presenta una DTP no fractal puesto que la D es muy próxima a 3.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 22,607. x^{0,384} \quad D = 2,616$$

$$R^2 = 0,994. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 47$$

- **Serie Bombeador**

#### Horizonte Superficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 56 micrómetros en el horizonte superficial, (Figura 2 a) con un  $R^2$  de 0,987 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 98,8 de la masa del suelo, el resto del material presenta una DTP no fractal puesto que la D es muy próxima a 3.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 22,017. x^{0,373} \quad D = 2,627$$

$$R^2 = 0,987. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 56$$

#### Horizonte Subsuperficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 56 micrómetros en el horizonte subsuperficial, (Figura 2 b) con un  $R^2$  de 0,984 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 98,7 de la masa del suelo, el resto del material presenta una DTP no fractal puesto que la D es muy próxima a 3.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 25,838. x^{0,334} \quad D = 2,666$$

$$R^2 = 0,984. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 57$$

- **Serie Centeno**

Horizonte Superficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 51 micrómetros en el horizonte superficial, (Figura 3 a) con un  $R^2$  de 0,998 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 98,5 de la masa del suelo, el resto del material presenta una DTP no fractal puesto que la D es muy próxima a 3.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 19,115. x^{0,419} \quad D = 2,581$$

$$R^2 = 0,998. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 51$$

Horizonte Subsuperficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 53 micrómetros en el horizonte subsuperficial, (Figura 3 b) con un  $R^2$  de 0,989 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 99,3 de la masa del suelo, el resto del material presenta una DTP no fractal puesto que la D es muy próxima a 3.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 19,642. x^{0,409} \quad D = 2,591$$

$$R^2 = 0,989. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 53$$

El elevado nivel de correlación, obtenido en las tres series de suelos analizadas, permite inferir que la DTP en el rango de tamaño de partículas estudiado es posible estimarla, empleando el modelo fractal.

En los suelos de las series analizadas SMO, como se puede observar en las figuras 1a, 1b, 2a, 2b, 3a y 3b y en la Tabla 4, el modelo fractal resultó el marco teórico adecuado para obtener la distribución de tamaño de partículas de los suelos estudiados entre 2 y 56  $\mu\text{m}$ . Los valores experimentales de los % acumulados de limo + arcilla fueron superiores al 95% en todos los casos.

En la Tabla 4 se presentan los valores del modelo fractal "C", "D",  $R^2$  y el p valor. Los niveles de correlación fueron elevados siendo la serie Bombeador subsuperficial la que obtuvo el menor valor con un  $R^2$  de 0,985 y un p valor  $<0.0001$ .

### **Distribuciones de tamaño de microagregados**

- Serie Arroz

#### Horizonte Superficial

El modelo fractal describió a las pseudopartículas comprendidas entre 2 y 100  $\mu\text{m}$  en el horizonte superficial, (Figura 4a) con un  $R^2$  de 0,978 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 100% de la masa del suelo.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 2.738 \cdot x^{0,713} \quad D = 2,287$$

$$R^2 = 0,978. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu\text{m}) < 100$$

### Horizonte Subsuperficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 100 micrómetros en el horizonte subsuperficial, (Figura 4b) con un  $R^2$  de 0,983 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 100 de la masa del suelo.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 3.501 \cdot x^{0,671} \quad D = 2,329$$

$$R^2 = 0,983. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 100$$

- Serie Bombeador

### Horizonte Superficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 100 micrómetros en el horizonte superficial, (Figura 5a) con un  $R^2$  de 0,982 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 100% de la masa del suelo.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 1.267 \cdot x^{0,859} \quad D = 2,141$$

$$R^2 = 0,982. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 100$$

### Horizonte Subsuperficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 100 micrómetros en el horizonte subsuperficial, (Figura 5b) con un  $R^2$  de 0,987 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 100 de la masa del suelo.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 1,5949. x^{0,847} \quad D = 2,153$$

$$R^2 = 0,987. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 100$$

- Serie Centeno

#### Horizonte Superficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 100 micrómetros en el horizonte superficial, (Figura 6a) con un  $R^2$  de 0,981 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 100% de la masa del suelo.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 0,823. x^{0,945} \quad D = 2,055$$

$$R^2 = 0,981. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 100$$

### Horizonte Subsuperficial

El modelo fractal describió a las partículas comprendidas entre 2 y 100 micrómetros en el horizonte subsuperficial, (Figura 6b) con un  $R^2$  de 0,952 y un  $p < 0,0001$ . En estas condiciones se alcanza a describir el 100 de la masa del suelo.

El modelo obtenido:

$$m. acum (\%) = 1,044 \cdot x^{0,930} \quad D = 2,070$$

$$R^2 = 0,952. p < 0,001$$

$$2 < x(\mu m) < 100$$

En los suelos de las series analizadas CMO, el modelo fractal resultó el marco teórico adecuado para obtener la distribución de tamaño de microagregados o pseudopartículas de los suelos estudiados entre 2 y 100 micrómetros.

En la Tabla 5 se presentan los valores del modelo fractal "C", "D",  $R^2$  y el p valor. Los niveles de correlación fueron elevados siendo la serie Centeno subsuperficial la que obtuvo el menor valor con un  $R^2$  de 0,952 y un p valor  $< 0.0001$ .

### **Microestructuración: cuantificación**

Para la determinación del efecto micro estructurante de la materia orgánica en las series de suelos analizados se realizó la comparación directa de los porcentajes de cada fracción granulométrica presentes en las muestras SMO y CMO. Se compararon directamente los porcentajes de cada fracción y su par aparente. De acuerdo a los resultados observados en la Tabla 7 se observa el efecto micro estructurante de la MO sobre el porcentaje de las fracciones

granulométricas que conforman las series de suelos analizadas. Dentro de las mismas se cuantificó una reducción significativa del valor de las arcillas aparentes respecto de las arcillas, similar sucedió con el tamaño limo, los limos aparentes fueron menores que los limos, mientras que la fracción tamaño arena, las arenas aparentes incrementaron su valor significativamente, respecto de las reales. Este comportamiento se debería a que la MO al actuar como cementante modifica los valores aparentes de estas fracciones ya que una las fracciones de menor tamaño que pertenecen a las fracciones limo y arcilla para formar (microagregados-pseudopartículas) conglomerados de mayor tamaño, las cuales se ubican dentro de los tamaños determinados como arenas.

Los valores mayores para cada uno de los tres tamaños de fracciones granulométricas que se observaron (Tabla 8) fueron: para el tamaño arcilla una reducción de hasta 16,1 veces en la serie Centeno superficial, para la fracción limo una reducción de 2,3 veces el contenido real, también dentro de la serie Centeno superficial y para la fracción arenas aparentes un aumento de 154,7 veces el contenido de arena real.

### **Modelo fractal SMO vs CMO**

Los parámetros C y D obtenidos del tratamiento SMO se diferenciaron estadísticamente ( $p < 0,0001$ ) respecto a los obtenidos CMO. En la Figura 7 se muestran estos resultados.

Por los efectos micro estructurantes de la materia orgánica, los modelos que describen la DTP y la DTM son diferentes. La distribución de microagregados es descripta por el modelo fractal. Los parámetros del modelo (C y D) disminuyen respecto de los mismos con el tratamiento SMO. Los resultados obtenidos concuerdan con el modelo teórico, al disminuir C, se trata de un material con menor contenido de partículas finas y al disminuir D, el material está más groseramente particionado. Gelati *et al.* (2019) arribó a resultados similares con suelos de diferentes clases texturales.

#### **IV. CONCLUSIONES**

La distribución de tamaño de partículas de los suelos estudiados, superficiales y subsuperficiales es de tipo fractal.

El proceso de micro estructuración, por efecto de la materia orgánica, que originan la pseudopartículas, hasta el tamaño analizado, 100  $\mu\text{m}$  resultó de tipo fractal. La masa de suelo descripta resultó menor que con el tratamiento SMO y desmejoró el ajuste.

En los tres suelos a las dos profundidades analizados con CMO se observó un incremento de la fracción de tamaño arena y una disminución de las fracciones de tamaño limo y arcilla respecto al tratamiento SMO.

## V. BIBLIOGRAFIA

- Avnir D., Biham O., Lidar D. & Malcai O. 1998. Is the Geometry of Nature Fractal? *Science*, vol. 279 no. 5347 pp. 39-40.
- Bartoli F., Philippy R., Doirisse M., Niquet S. & Dubuit M. 1991. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: The fractal approach. *J. Soil Sci.* 42: 167-185.
- Behzad G. & Daigle H. 2015. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis. *Geoderma* 245–246 (2015) 98–103.
- Bittelli M., Campbell G.S. & Flury M. 1999. Characterization of particle-size distribution in soil with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 782–788.
- Campbell G. & 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.
- Caruso T., Barto E.K., Siddiky M.R.K., Smigelski J. & Rillig M.C. 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.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., & Robledo C.W., InfoStat versión 2018, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, URL <http://www.infostat.com.ar>
- FAO 1996, Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. Estudio FAO Montes 131. Disponible en: <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm>. (Última consulta 5-5-2020)
- Filgueira R.R., Pachepsky Y., Fournier L.L. 2003. Time-mass scaling in soil texture analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1703-1706. ISSN 0361-5995.

- Filgueira R.R., Gelati P.R., Fournier L.L. & Sarli G.O. 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 R.R., Fournier L.L., Sarli G.O. & Soracco C.G. 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 R.R., Fournier L.L., Cerisola C.I., Gelati P.R. & 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. & 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. & Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. methods of soil analysis, part 1. Physical and minerological methods. Agronomy Monograph N° 9. Second Edition. Pp. 383-411.
- Gelati P.R., Sarli G.O., y Filgueira R.R., 2016. Estudio fractal de la distribución de tamaño de partículas y pseudopartículas en suelos de la pradera pampeana. Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Gelati P.R., Sarli G.O., Lozano L.A. & 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.
- Hyslip J. & Vallejo L. 1997. Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. Engineering Geology 48, 231-244.
- Korvin G. 1992. Fractal Methods in the Earth Sciences. Elsevier, Amsterdam. 191 p.

- Lanfranco J., Pellegrini A. & Cattani V.M. 2014. Contenidos de edafología: Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo. Edulp.
- Lanfranco J.W. & Carrizo R. 1987. Carta de suelos de la estación experimental Central Julio Hirschhorn de la FCAyF/UNLP. Inédito
- Mandelbrot B. 1982. The fractal geometry of nature. W.h. Freeman and Company. New York.
- Millán H., Gonzalez-Posada M., Aguilar M., Domínguez J. & Céspedes L. 2003. On the fractal scaling of soil data. Particle size distributions. Geoderma 117, 117-128.
- Perfect E., Díaz Zorita M. & Grove J. 2002. A prefractal model for predicting soil fragment size distributions. Soil and Tillage Research 36,1-20.
- Richter M., Mizuno I., Arangué S. & Uriarte S. 1975. Densimetric fractionation of soil organic matter. Journ. Soil sci. 26: 112-123.
- SAMLA. 2004. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina. Dirección de Producción Agrícola. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos Agua, Vegetales y Enmiendas Orgánicas.
- Stanchi S., Bonifacio E., Zanini E. & Pachepsky Y. 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., Bonifacio E. & 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. & Perfect E. 1999. Simulation and testing of self-similar structures for soil particle size distributions using iterated function systems. Geoderma 88, 191 -203.

Tyler S.W. & Wheatcraft S.W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 362–369.

USDA – United States Department of Agriculture. <http://www.usda.gov>

Vdovic N., Obhodas J. & Pikelj K. 2010. Resvisiting the particle-size distribution of soils: comparison of different methods and simple pre-treatments. *European Journal of Soil Science*, 61, 854-864.

Walkley A. & Black I. 1934. An examination of the Degtjareff method and a proposed modification of the chromic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 34: 29-38.

## VI. Apéndice de tablas y figuras

*Tabla 1-* Esquema de tiempos necesarios para obtener las fracciones acumuladas de diámetro aparente  $\phi$  ( $\mu\text{m}$ ) en función de la profundidad de extracción ( $\Delta y$ ) y la temperatura de la suspensión.

Hora	Minutos	Segundos	$\Delta y$ (cm)	t ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\phi$ ( $\mu\text{m}$ )
-	-	22	20	20	100
-	1	29	20	20	50
-	5	58	20	20	25
-	18	38	10	20	10
1	14	30	10	20	5
3	52	49	5	20	2

Tabla 2- Caracterización de los horizontes superficiales de las tres series de suelos analizadas. Se expone el porcentaje de carbono orgánico total (COT), porcentaje de tamaño de partícula arenas (A), Limo (L) y arcillas (arc).

Superficial (0-15 cm)	Serie Arroz	Serie Bombeador	Serie Centeno
(Soil taxonomy)	Ocracualf típico arcillosa fina	Argiudol típico arcillosa fina illítica	Argiudol típico arcillosa fina illítica térmica
COT (%)	3,46	2,05	2,85
A (%)	0,4	5,6	1,6
L (%)	67,7	65,9	72,8
arc (%)	31,9	28,5	25,6
Clase textural clasificación USDA	Franco limoso arcilloso	Franco limoso arcilloso	Franco limoso

Tabla 3--Caracterización de los horizontes subsuperficiales de las tres series de suelos analizadas. Se expone el porcentaje de carbono orgánico total (COT), porcentaje de tamaño de partícula arenas (A), Limo (L) y arcillas (arc).

Sub superficial (15-30 cm)	Serie Arroz	Serie Bombeador	Serie Centeno
Taxonomía (Soil Taxonomy)	Ocracualf típico arcillosa fina	Argiudol típico arcillosa fina illítica	Argiudol típico arcillosa fina illítica térmica
COT (%)	1,49	1,75	1,41
A (%)	0,5	4,9	2,9
L (%)	70	62,6	70,9
arc (%)	29,5	32,5	26,2
Clase textural Clasificación USDA	Franco limoso arcilloso	Franco limoso arcilloso	Franco limoso

Tabla 4-*Caracterización de los suelos sin materia orgánica (SMO), observándose los parámetros del modelo fractal C y D, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la probabilidad (p valor) y el diámetro de tamaño de partícula hasta el cual el modelo fractal tiene significancia.*

Suelo	C	D	$R^2$	p valor	diámetro común
-------	---	---	-------	---------	----------------

					$\emptyset$ ( $\mu\text{m}$ )
Arroz Sup	24,789	2,636	0,993	<0,0001	46
Arroz Subsup	22,607	2,616	0,994	<0,0001	47
Bombeador Sup	22,017	2,627	0,987	<0,0001	56
Bombeador Subsup	25,838	2,666	0,984	<0,0001	56
Centeno Sup	19,115	2,581	0,998	<0,0001	51
Centeno Subsup	19,642	2,591	0,989	<0,0001	53

*Tabla 5- Caracterización de los suelos con materia orgánica (CMO), observándose los parámetros del modelo fractal C y D, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la probabilidad (p valor) entre los tamaños de pseudopartículas de 2 y 100 micrómetros.*

Suelo	C	D	$R^2$	p valor
Arroz Sup	2,738	2,287	0,978	<0,0001

Arroz Subsup	3,501	2,141	0,983	<0,0001
Bombeador Sup	1,267	2,141	0,982	<0,0001
Bombeador Subsup	1,549	2,153	0,987	<0,0001
Centeno Sup	0,823	2,055	0,981	<0,0001
Centeno Subsup	1,044	2,07	0,952	<0,0001

*Tabla 6- Contenido en % de Carbono orgánico y de Materia Orgánica correspondiente a cada suelo*

Suelo	% CO	% MO
-------	------	------

Arroz Sup	3,46	5,96
Arroz Subsup	1,49	2,58
Bombeador Sup	2,05	3,53
Bombeador Subsup	1,75	3,02
Centeno Sup	2,85	4,92
Centeno Subsup	1,41	2,43

*Tabla 7- Efecto microestructurante de la MO. SMO= determinación del tamaño de la partícula previa eliminación de la materia orgánica y CMO con materia orgánica*

	ARCILLA		LIMO		ARENA	
	SMO	CMO	SMO	CMO	SMO	CMO
Arroz Sup	31,9	4,5	67,8	39,9	0,3	55,5
Arroz SubSup	29,5	5,6	70	42,6	0,5	51,8
Bomb. Sup	28,5	2,3	65,9	34,1	5,6	63,6
Bomb Subsup	32,5	2,8	62,5	39,7	4,9	57,5
Centeno Sup	25,5	1,6	72,9	31,5	1,6	66,9
Centeno Subsup	26,1	2,0	70,9	37,6	3,0	60,4

*Tabla 8- Relaciones entre las fracciones granulométricas de las series sin materia orgánica y con materia orgánica.*

	A/Aap	L/L ap	arc/arc ap
Arroz sup	0,005	1,7	7,1
Arroz subsup	0,009	1,6	5,3
Bombeador sup	0,088	1,9	12,4
Bombeador subsup	0,085	1,6	11,7
Centeno sup	0,024	2,3	16,1
Centeno subsup	0,049	1,9	13,1

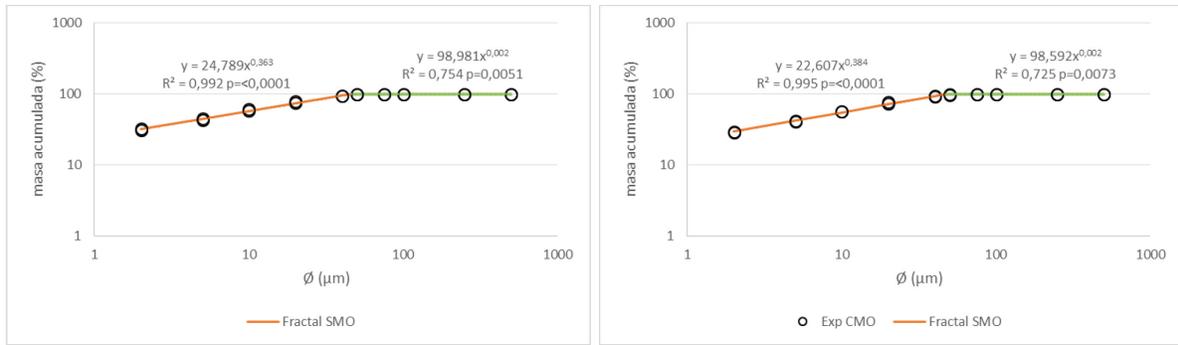


Figura 1- a) Distribución de tamaño de partículas de la Serie Arroz horizonte superficial. b) Distribución de tamaño de partícula de la serie Arroz, horizonte subsuperficial. En ambos casos, la recta de color rojo corresponde a la DTP de tipo fractal y la recta verde corresponde a la DTP de tipo no fractal.

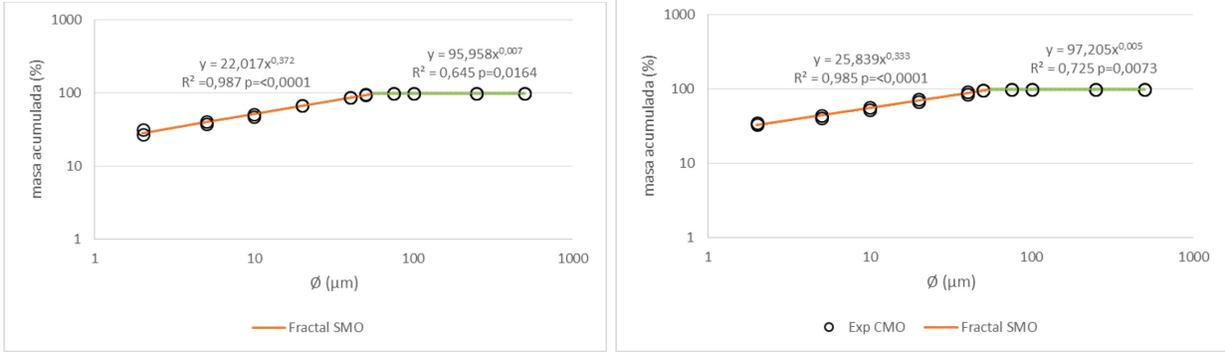


Figura 2- a) Distribución de tamaño de partículas de la Serie Bombeador horizonte superficial. b) Distribución de tamaño de partícula de la serie Arroz, horizonte subsuperficial. En ambos casos, la recta de color rojo corresponde a la DTP de tipo fractal y la recta verde corresponde a la DTP de tipo no fractal.

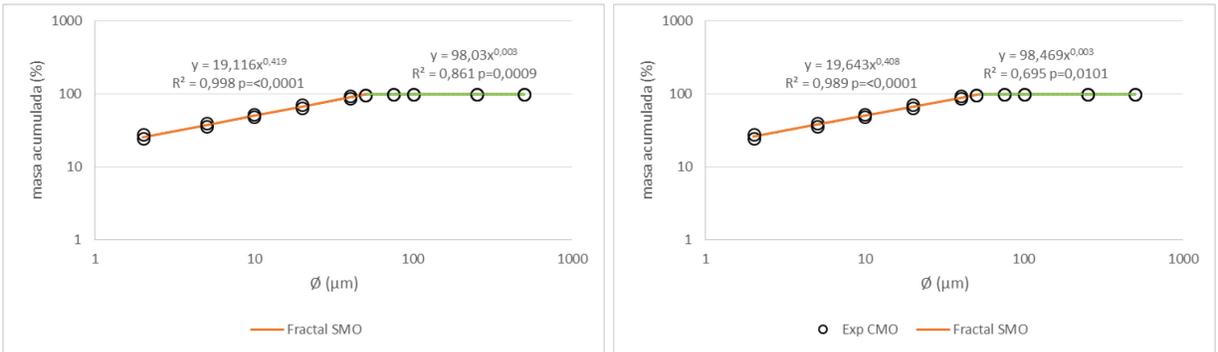


Figura 3- a) Distribución de tamaño de partículas de la Serie Centeno horizonte superficial. b) Distribución de tamaño de partícula de la serie Arroz, horizonte subsuperficial. En ambos casos, la recta de color rojo corresponde a la DTP de tipo fractal y la recta verde corresponde a la DTP de tipo no fractal.

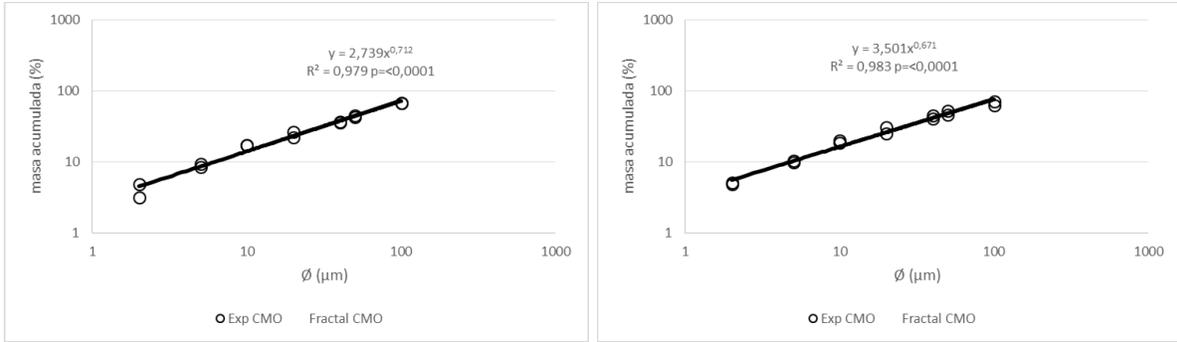


Figura 4- a) Distribución de tamaño de microagregados de la serie Arroz superficial. b) distribución de tamaño de microagregados de la serie Arroz, horizonte subsuperficial.

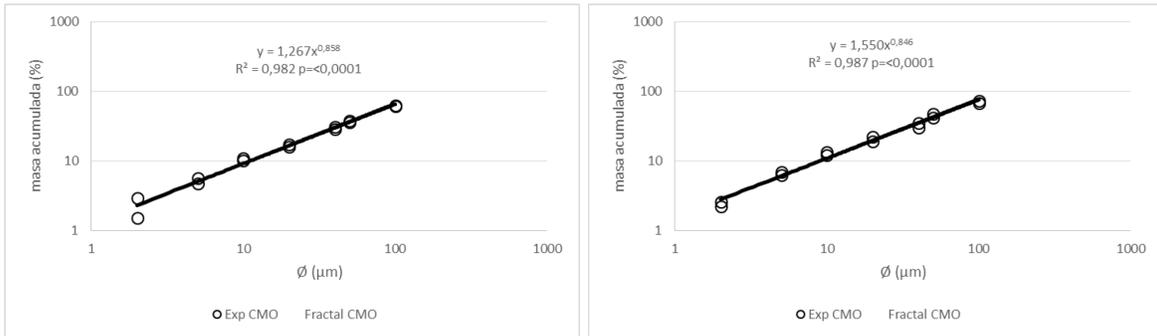


Figura 5- a) Distribución de tamaño de microagregados de la serie Bombeador, horizonte superficial. b) Distribución de tamaño de microagregados de la serie Bombeador, horizonte subsuperficial.

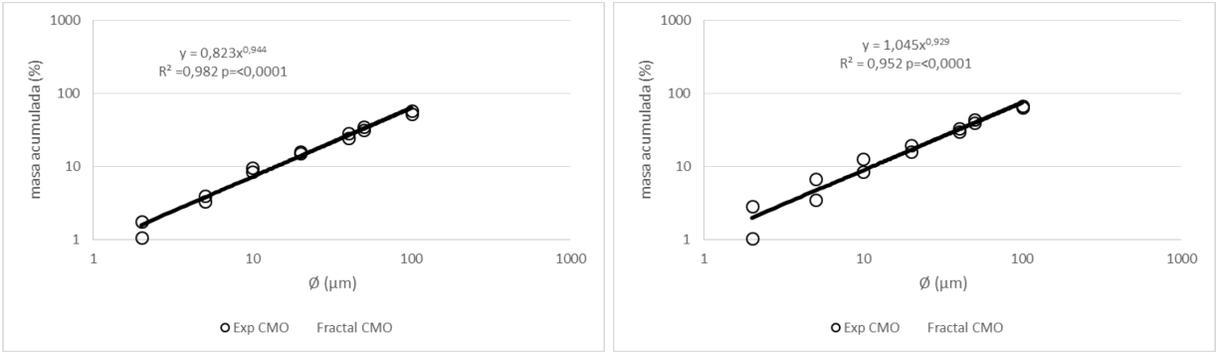


Figura 6- a) Distribución de tamaño de microagregados de la serie Centeno, horizonte superficial. b) Distribución de tamaño de microagregados de la serie Centeno, horizonte subsuperficial.

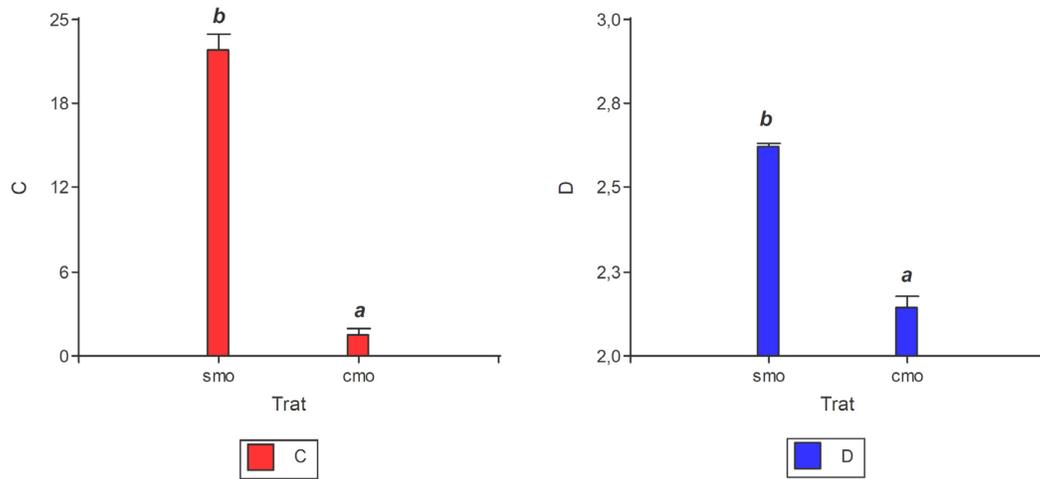


Figura 7-a) Comparación de las medias de los parámetros fractales C para los pretratamientos sin materia orgánica (SMO) y con materia orgánica (CMO) b) Comparación de las medias de los parámetros D (SMO – CMO). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )