



APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA AL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA Y LA POROSIDAD DEL SUELO

Ángela Pinzón

Universidad de
Cundinamarca, Facultad de
Ingeniería Agronómica
✉:
mangelapinzon@gmail.com

Palabras clave:

Tomografía computarizada,
análisis de imágenes,
**Typic Hapludands; Andic
Dystrudepts**

RESUMEN

*Las técnicas avanzadas de visualización, tales como la (TC), ofrecen nuevas oportunidades de explorar la heterogeneidad de la estructura y la porosidad interna del suelo sin disturbar. El objetivo de la investigación es aplicar esta tecnología para profundizar en el conocimiento de la estructura y la porosidad en los suelos. Se estudiaron dos suelos clasificados como **Typic Hapludands** y **Andic Dystrudepts**. En el **Hapludands** se utilizó una columna de suelo de 50 X 20 X 10 cm; en el suelo **Dystrudepts** se utilizaron muestras en cilindro de 5 cm de alto y 10.5 cm de diámetro.*

*Al analizar las imágenes, se observó que, en los primeros 20 cm de los dos perfiles hay diferencia en la estructura en cuanto a forma, tamaño y desarrollo. En el suelo **Typic Hapludands**, los agregados son granulares fuertes, se observan claramente los macroporos conectados y con formas definidas; al profundizar se nota que el perfil exhibe dos regiones diferentes en cuanto a agregación y a la porosidad, en él se encuentran bioporos, formados por lombrices, los cuales son largos y continuos, mientras que los formados por las raíces son continuos pero muy variables en tamaño y forma. El suelo **Andic Dystrudepts** exhibe una mayor tortuosidad en los primeros 20 cm, poca conectividad y una orientación más vertical, mientras que en profundidad los poros son escasos y con orientación horizontal sin conectividad, esto debido a una estructura débil con poco desarrollo. Los dos suelos presentan gran diferencia tanto en la estructura como en la porosidad, sin embargo discutir estas dos propiedades por separado, dejaría un vacío en cuanto a su conceptualización y por consiguiente en su aplicación. En conclusión, la TC permite conocer grandes detalles morfológicos de impacto en la descripción y estudio de rasgos complejos del suelo.*

APPLICATION OF COMPUTED TOMOGRAPHY TO STUDY THE STRUCTURE AND SOIL POROSITY

Key words: Computed
tomography, Image
analysis, **Typic
Hapludands; Andic
Dystrudepts**

SUELOS ECUATORIALES
43 (1): 9-16

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

*The advances obtained by the use of computerized tomography in the soil studies provide powerful measuring tools for studying the internal soil structure and porosity; by means of this technique it has been possible to get into the different processes of soil dynamics, such as water movement, gasses exchange, rooting and biota activity in soil profile. Consequently, it is the scope of present work to deepening through CT on the knowledge of an undisturbed soil structure and porosity. To do so, the soil structure and porosity of Ap, A₁, Bw₁ and Bw₂ horizons of a **Typic Hapludands** (first 50 cm profile), and **Andic Dystrudepts** (first 60 cm profile), was sampled cylinders 10.5 in diameter by 5 high, both soils were evaluated using a Hispedd Dual (General Electric) apparatus.*

*The two soils were scanned to obtain respectively 2 and 1 mm cuttings; same way, axial, coronal and saggital planes were displayed. Image analysis from scanning permitted to observe rounded structures in the **Ap** and **A₁** horizons, which resulted to be granular units showing very much connected pores and abundant roots as well as organic activity; **Bw₁** horizon shows a stronger structure, well defined edges, lower porosity and few channels driven by soil organisms; **Bw₂** horizon has strong angular blocky structure. **Dystrudepts Andic** soil exhibits greater tortuosity in the first 20cm, connectivity and little more vertical orientation, while the pores are scarce depth and horizontal orientation without connectivity. As a conclusion, CT technique allows through observation on very fine cuttings to get an insight on morphological features of define importance in soil description; all those characteristics are of significance and utility when analyzing not only the structure but soil dynamics.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que enfrenta actualmente la ciencia del suelo puede originarse en la aplicación de técnicas agresivas al momento del muestreo, especialmente con fines de evaluación de la condición física del suelo; naturalmente ello trae errores tanto en los resultados como en sus aplicaciones. La presente investigación se propone utilizar técnicas avanzadas de observación visual como la tomografía computarizada (TAC) que, ofrece nuevas oportunidades para explorar la heterogeneidad de la estructura interna y de la porosidad del suelo en condiciones inalteradas.

En las últimas dos décadas la investigación en física de suelos experimentó un notable avance con la aplicación de la tomografía computarizada de rayos X TC. Esta técnica fue introducida en la ciencia del suelo por Petrovic en 1982, Hainsworth y Aylmor en 1983 y Crestana en 1985, quienes demostraron su aplicación para medir la distribución espacial (2 y 3 dimensiones) de la estructura y porosidad del suelo. Desde entonces, los avances en la instrumentación del TC han permitido conocer más a fondo características y propiedades del suelo tales como la porosidad, la estructura, el flujo preferencial, la aireación y la actividad de la edafofauna.

Actualmente, especialmente en Europa, algunos autores han utilizado esta técnica para profundizar en el conocimiento de la microestructura y porosidad y su relación con las demás propiedades y características del suelo; Chun et al. (2008) examinaron la morfología y el arreglo espacial de poros intra- agregados entre 8 y 20 mm; Peth et al (2008), reportaron pequeños poros nodales en agregados de 5mm utilizando la TC; Papadopoulos et al (2009), notó diferencias en la forma de los poros en agregados de 5 mm, al comparar suelos estables e inestables.

La estructura reviste gran importancia en la caracterización física del suelo; sin embargo, poco se ha profundizado en los estudios atinentes a las relaciones internas de aquella con el movimiento de agua y de aire en el suelo y, especialmente su relación con la fauna edáfica. Los primeros físicos de suelos decían que “la estructura era la base de la fertilidad del suelo”; hoy día se dice que la sostenibilidad de un agroecosistema resulta comprometida por la degradación de la estructura del suelo.

La porosidad del suelo está ligada a la estructura (micro y macroestructura) en cada horizonte y depende por consiguiente de los mismos factores que condicionan su desarrollo, (tipo de arcilla, contenido y estado de la materia orgánica, fauna edáfica y presencia de raíces). De acuerdo con su tamaño, a través de los poros ocurren fenómenos físicos (fuerzas, flujos etc.), en función de los cuales el agua retenida en los poros más finos está sujeta a fuerzas adsorptivas, es discontinua y no participa en los fenómenos ordinarios de flujo líquido; además, en estos dominios el agua puede desviarse de las leyes de la capilaridad y flujo de Darcy, mientras que en los poros medios el agua obedece las leyes de capilaridad en estado no saturado; por ello es necesario conocer con más exactitud el arreglo geométrico y topológico de los poros del suelo para no caer en el simplismo de clasificarlos en las tres categorías coloquiales de tamaño o en su definición como espacios vacíos.

La estructura del espacio del poro es importante por la capacidad que tiene para transportar el agua, Lin y otros (1996) afirman que los macroporos y mesoporos constituyen el 89 y el 10%, respectivamente, del flujo de agua a una tensión de 0- cm y los microporos el 1% restante del flujo. Los macroporos no sólo reducen la pérdida de nutrientes sino el volumen de escorrentía. La forma, tipo y desarrollo de los agregados determinan la geometría y la red de los poros y éstos a su vez, el ambiente biogeoquímico, la biofísica y la distribución, absorción, retención y liberación de los nutrientes, como también la absorción y transporte de los contaminantes en el suelo.

Otro parámetro importante que se usa con frecuencia para determinar características de los poros y el movimiento del agua a través de ellos es su forma. Cuanto mayor es el tamaño del poro, mayor la probabilidad de que éste se alargue o se aplane, ello cambia la dinámica de flujos dentro del perfil. La forma de los poros es importante en la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo; la circularidad del poro puede estar relacionada con el movimiento del agua, a menos que los poros circulares tengan más resistencia al flujo, debido a una mayor superficie de la pared del poro con respecto a su sección transversal; por lo tanto, el área y el perímetro del poro juegan un papel importante en el flujo preferencial. Cuando los poros son cilíndricos, el

desplazamiento de la solución del suelo durante el drenaje es de tipo pistón; por el contrario en poros angulares e irregulares restos de líquido se acumulan en las esquinas de éstos (Pachepsky et al. 1996).

El tema de la estrecha relación entre estructura y porosidad del suelo, resulta de suma importancia, a la hora de entender la dinámica de la estructura y la evolución de los sistemas edáficos tanto en sus componentes bióticos como abióticos.

Aceptando que el conocimiento de la estructura y la porosidad del suelo es todavía muy limitado dada las clases de técnicas tradicionalmente utilizadas para ello, resulta conveniente aprovechar la nueva técnica de Tomografía Computarizada, la cual revela aspectos no diferenciables por las técnicas más avanzadas de estudio hasta el presente. Por lo tanto, se pretende con este trabajo mostrar cómo las imágenes de TC pueden integrarse al análisis de la estructura y porosidad del suelo para dilucidar su evolución, procesos e interacciones con sus demás propiedades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos

El suelo *Typic Hapludands* (fig. 1a), se recolectó en la ciudad de Facatativá a 45.3 km de la ciudad de Bogotá, se encuentra ubicado en las laderas de vertiente con pendientes de 12%. El suelo *Andic Dystrudepts* (fig 1b), se describió en el municipio de Bojacá a 40 km de Bogotá, se localiza en la parte baja de las laderas de vertiente, con pendientes entre el 10 y 15%.

El desarrollo pedogenético del suelo *Typic Hapludands* ha ocurrido a partir de materiales volcánicos y morfológicamente presenta una distribución de horizontes Ap-A₁-Bw₁-Bw₂, C₁ y C₂. El primer horizonte (Ap) tiene una profundidad entre 22 y 25 cm, color negro (2.5 YR 2.5/0), textura franca, estructura granular fina moderadamente desarrollada, abundantes organismos, y alta porosidad fina y media. El horizonte A₁ tiene una profundidad de 15 cm, color negro (2.5 YR 2.5/2), textura franco-arcillosa, estructura granular mediana, gran cantidad de organismos y raíces finas y medias. Subyaciendo a los anteriores, aparece un horizonte cambico conformado por dos horizontes, Bw₁ y Bw₂, el primero de color café y el segundo amarillo rojizo, textura franco-arcillosa para el primero y arcillosa para el Bw₂; la estructura es de bloques subangulares bien desarrollados y fuertes; hay poca cantidad de raíces

gruesas y medias, especialmente en el Bw₂. Finalmente, se encuentran los horizontes C₁ y C₂, de color pardo-amarillento, y manchas litocrómicas en un 10% de color gris claro para el primer horizonte y en un 40% para el segundo, textura arcillosa y sin desarrollo estructural.

El suelo *Andic Dystrudepts* (fig 1b), se encuentra en la parte baja de la ladera estructural, de relieve moderadamente escarpado. El desarrollo pedogenético de este suelo proviene de ceniza volcánica y morfológicamente presenta la siguiente distribución de horizontes: Ap-AB-B₁-B₂-C-R. El horizonte superficial Ap tiene una profundidad de 16 cm, de color negro, textura FArA, con estructura granular media y moderada, poros interpedales medios e intrapedales medios y finos, en húmedo ligeramente pegajosa y ligeramente plástica, alta actividad de organismos; a continuación se encuentra el horizonte AB (16-30cm), de color café oscuro con moteados de color marrón, textura FArA, estructura de bloques medianos que rompen en agregados granulares finos, poros finos intrapedales y medios interpedales, consistencia en húmedo ligeramente pegajosa y ligeramente plástica, alta actividad de organismos; posteriormente se tienen los horizontes B₁ y B₂ (30 a 60 y 60-75 cm) los cuales presentan colores más claros pardo amarillento para el B₁ y amarillo para el B₂, con texturas FAr, estructuras de bloques subangulares fuertes, poros finos intrapedales y canales largos finos interpedales, consistencia en húmedo pegajosa y plástica, escasa población de organismos y de raíces. Finalmente, se encuentran los horizontes C₁ y C₂, de color amarillo, textura franco-arcillosa y sin desarrollo estructural. Químicamente son de reacción mediana a ligeramente ácida, contenido de nutrientes (Ca, Mg, K, P) medios a bajos, media a alta capacidad de intercambio catiónico y media a baja saturación de bases.

Equipo

Para esta investigación se utilizó un tomógrafo médico Hispedd Dual (General Electric). El equipo emite un haz muy fino de rayos X, este haz incide sobre el objeto en estudio el cual es atravesado por la radiación. La radiación que no ha sido absorbida por el objeto, es recogida por los detectores; luego, el emisor del haz, que tenía una orientación determinada (por ejemplo, vertical a 90°) cambia su orientación (haz oblicuo a 95°); este espectro es también recogido

por los detectores. Un ordenador 'suma' las imágenes, promediándolas y nuevamente, el emisor cambia su orientación unos 100° de inclinación. Los detectores recogen este nuevo espectro, lo 'suman' a los anteriores y 'promedian' los datos. Este procedimiento

se repite hasta que el tubo de rayos X y los detectores han dado una vuelta completa, momento en el cual se dispone de una imagen tomográfica definitiva y confiable.



Figura 1a. Typic Hapludands

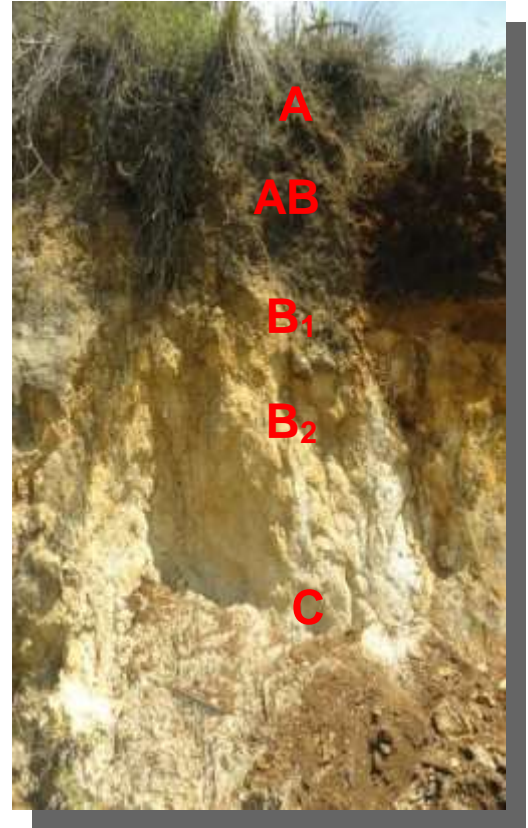


Figura 1b. Andic Dystrudepts

Procedimiento

Para el desarrollo de la prueba con el TC se tomaron dos alternativas para los suelos estudiados, en el suelo *Typic Hapludands* se utilizó una columna de suelo sin disturbar de 50x20x10cm., y para el suelo *Andic Dystrudepts* se utilizaron muestras en cilindro de 5cm de alto y 10 cm de diámetro (figura 2); la razón por la cual se tomó la decisión de muestrear en dos formas diferentes, fue debido a que los dos suelos presentan características diferentes, especialmente en cuanto a estructura del suelo; el suelo *Andic Dystrudepts* con estructura granular media moderada a débil, fue imposible que ésta se mantuviera firme para muestrear en columna. Ambas muestras fueron sometidas a escaneo en cortes de 2 y 1 mm, en tres planos, así: axial (transversal), coronal (anteroposterior) y sagital (longitudinal)

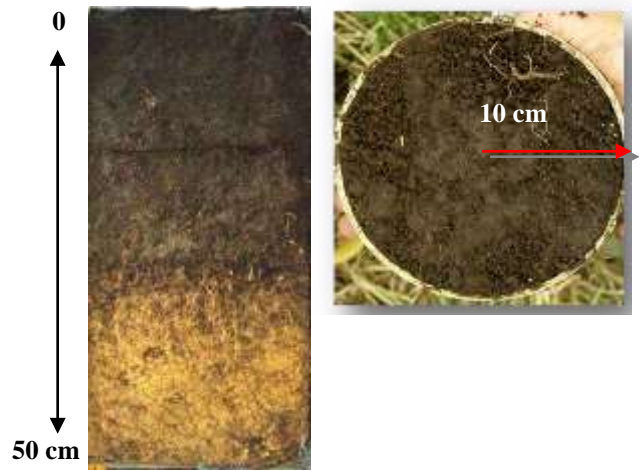


Figura 2. Muestreo de los dos suelos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las imágenes de los suelos estudiados muestran claramente que estos presentan diferencias tanto en la estructura como en la porosidad, dado el contraste de tamaños, forma, grado de conectividad y sinuosidad de los espacios porosos en cada uno de los horizontes; sin embargo, discutir estas dos propiedades por separado, implicaría establecer un vacío conceptual que dificultaría la posibilidad de encontrar una interpretación y aplicarla al estudio de problemas en el campo de la física.

La figura 3a (horizonte **Ap** del suelo *Typic Hapludands*), muestra un gran desarrollo de la estructura granular; por consiguiente, los poros resultantes son abundantes, de diferente tamaño, algunos de formas tubulares debido a la actividad de raíces y lombrices. La mayoría de estos poros presenta alta conectividad y formas tubulares; en otros casos los poros son aplanados, lo cual puede deberse a una deformación de su morfología, en principio tubular, que posteriormente colapsó (fig 4a). La estructura en el horizonte A del suelo *Andic Dystrudepts* (fig. 3b) permite observar diferencias con la del horizonte **Ap** dada su estructura granular, de grado moderado a débil, debido a unos bajos contenidos de materia orgánica y a la textura FArA. La misma figura 3b permite observar poros interpedales medios e intrapedales finos. En su mayoría los poros son planares (fig.4b), algunos redondeados muy finos e inconexos; se observan claramente las fronteras de los poros.

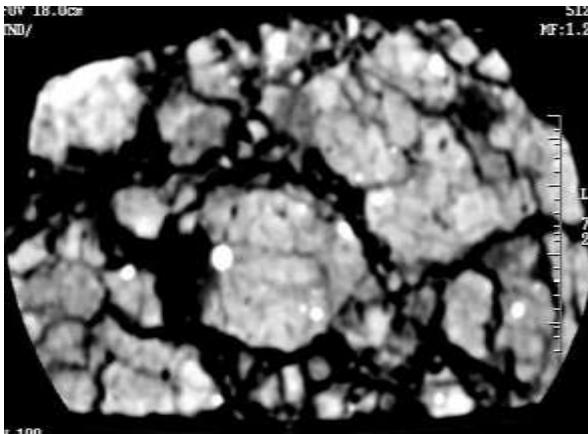


Figura 3a. Estructura del Horizonte Ap del suelo Typic Hapludands

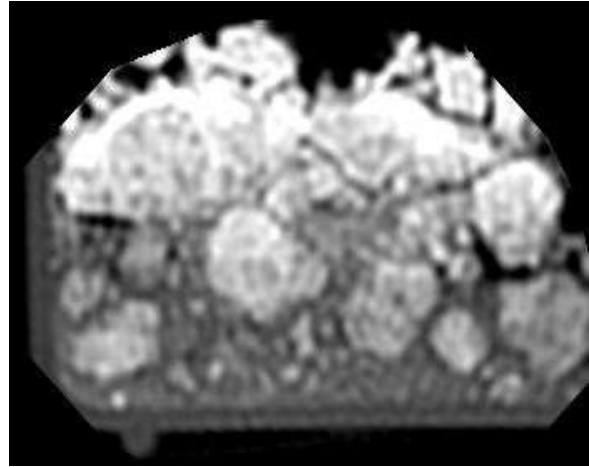


Figura 3b. Estructura del Horizonte A del suelo Andic Dystrudepts

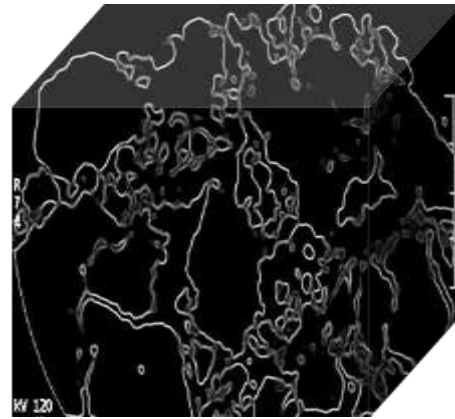


Figura 4a. Porosidad del Horizonte Ap del suelo Typic Hapludands

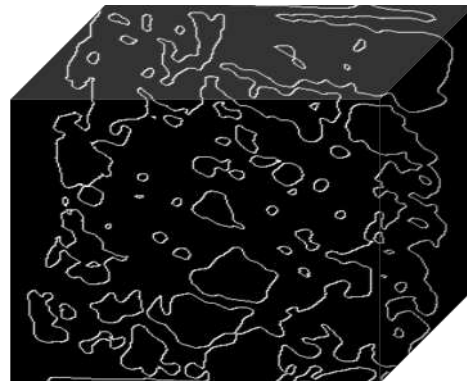


Figura 4b. Porosidad del Horizonte A del suelo Andic Dystrudepts

La relación estructura-porosidad en el segundo horizonte (A_1) del suelo *Typic Hapludands*, es similar a la analizada para el primer horizonte, con la diferencia de que el decrecimiento de materia orgánica (3% menos que el horizonte superior), y un incremento de arcilla, ha permitido el desarrollo de una estructura granular fuerte en un 60% y de bloques subangulares finos y fuertes en un 40% (fig. 5a). En consecuencia, la porosidad del horizonte A_1 es tortuosa (fig. 6a) al compararla con la del epipedon (A_p), con poca conectividad y con orientación más horizontal que vertical; esto impide el transporte relativamente rápido de agua, gases y solutos.

En el horizonte AB del suelo *Andic Dystrudepts* la estructura observada en campo es de bloques medianos que rompen a agregados granulares finos. La imagen de tomógrafo (fig. 5b) permite observar el efecto de esa ruptura, al igual que una disminución ostensible de la porosidad del horizonte. En la figura 6b, se puede observar igualmente la presencia de poros con poca conectividad, formas tubulares y planas, algunos microtúbulos elaborados por los organismos y zonas muy densificadas.

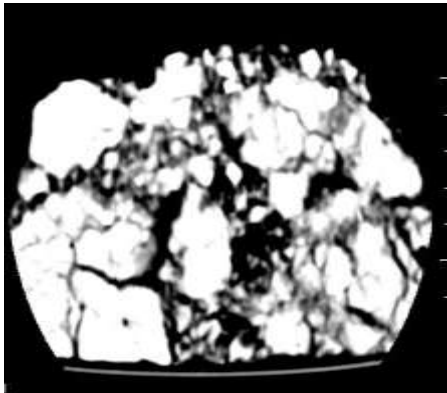


Figura 5a. Estructura del Horizonte A_1 del suelo *Typic Hapludands*

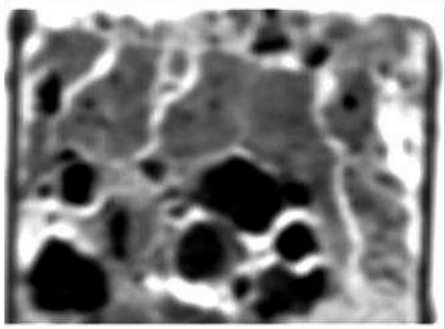


Figura 5b. Estructura del Horizonte AB del suelo *Andic Dystrudepts*

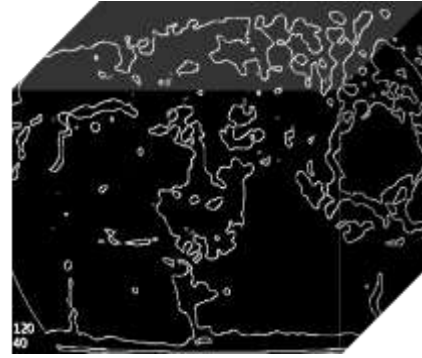


Figura 6a. Porosidad del Horizonte A_1 del suelo *Typic Hapludands*

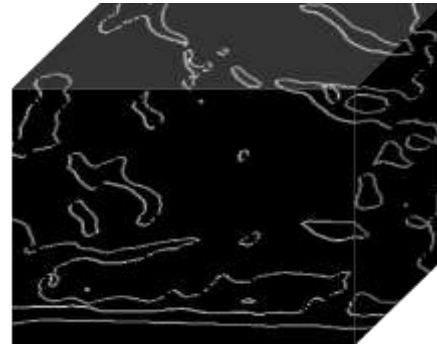


Figura 6b. Porosidad del Horizonte AB del suelo *Andic Dystrudepts*

Los dos suelos en el horizonte Bw_1 y B_1 respectivamente, *Typic Hapludands* y *Andic Dystrudepts*, presentan en campo una estructura de bloques subangulares muy bien desarrollados, fuertes y muy grandes, que rompen en cualquier dirección; al observar la imagen TC no se observan agregados definidos, (fig. 7a y 7b), En horizonte Bw_1 (*Typic Hapludands* fig.8a) se observan escasos poros circulares muy finos aislados sin ninguna conexión, se detecta la presencia de un túbulo que fue dejado por una raíz, es reconocido por que sus paredes son más tortuosas e irregulares que el túbulo que dejan las lombrices. La imagen del horizonte B_1 (*Andic Dystrudepts* (figura.8b) muestra algunos canales y una cavidad dejada por una chiza. Ya en la parte práctica se debe tener en cuenta cómo se comportan los fluidos en estos horizontes y como el agua retenida en los poros muy finos está sujeta a fuerzas adsorptivas, es discontinua y no participa en los fenómenos ordinarios de flujo líquido, por lo tanto es poco probable que la planta la pueda utilizar.

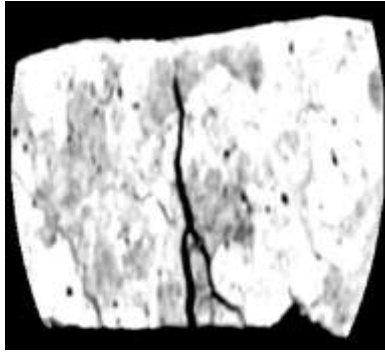


Figura 7a. Estructura del Horizonte Bw1 del suelo *Typic Hapludands*

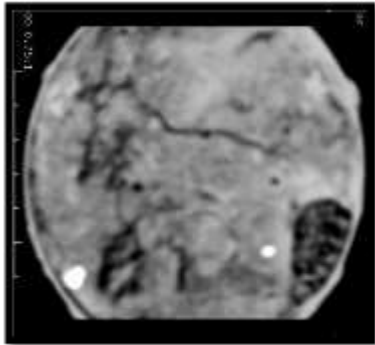


Figura 7b. Estructura del Horizonte B1 del suelo *Andic Dystrudepts*

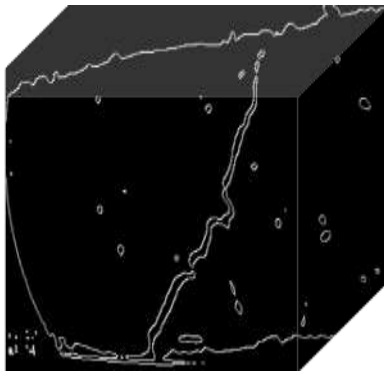


Figura 8a: Porosidad del Horizonte Bw1 del suelo *Typic Hapludands*

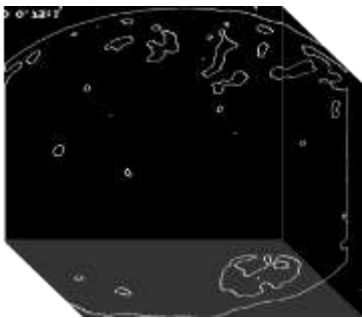


Figura 8b: Porosidad del Horizonte B1 del suelo *Andic Dystrudepts*

Las imágenes que se muestran a continuación (fig. 9a, 9b y 9c) corresponden a la porosidad del suelo *Andic Dystrudepts*, en donde se adicionó medio de contraste para poder diferenciar con más detalle la morfología y conectividad de los poros.

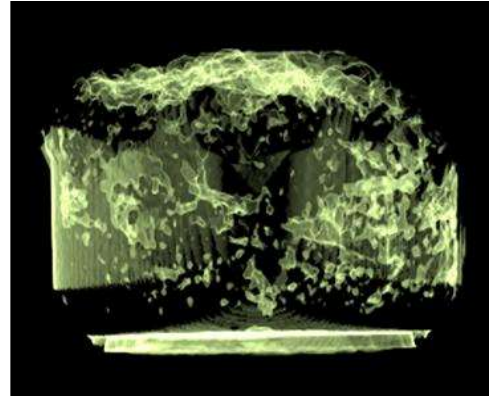


Figura 8a. Porosidad del horizonte Ap

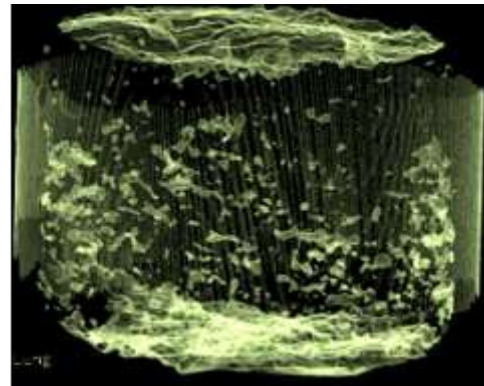


Figura 8b. Porosidad del horizonte AB

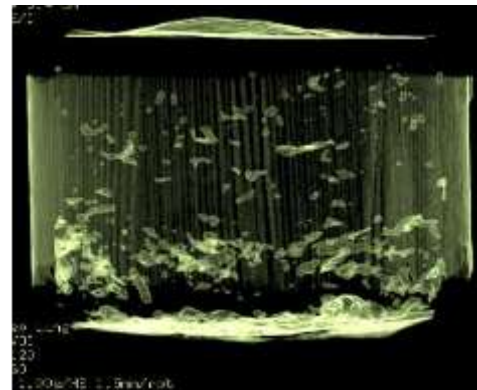


Figura 8c. Porosidad del horizonte B1

CONCLUSIONES

A medida que se avance en el empleo específico de este recurso tecnológico pueden generarse nuevos aportes teóricos que den explicaciones a intrincados procesos aún desconocidos en la dinámica física del suelo.

Al avanzar en refinamiento de esta técnica quizá pueda analizarse no solo la morfología, tamaño, su complejidad interna y su estrecha relación entre la porosidad y la estructura, sino explicar al menos en teoría las implicaciones de una u otra condición estructural y porosa del suelo.

La estrecha relación que hay entre porosidad y la estructura del suelo quizá permite orientar estudios sobre su dinámica además de circunscribir la ciencia del suelo a solo las descripciones morfológicas de gran utilidad y repercusión en una primera instancia, pero limitadas.

La incursión de la técnica de la TC en el estudio de rasgos del suelo no visualizados mediante otras técnicas, como lo es la estructura y la porosidad, permite tener unos elementos de juicio para hacer predicciones válidas y en consecuencia explicaciones más certeras en cuanto a flujo preferencial y al intercambio gaseoso.

Dado que la porosidad del suelo está ligada a la estructura de cada horizonte, depende por consiguiente de los mismos factores de ésta, no se puede ser simplista al clasificar los poros en tres categorías o definirlos como espacios vacíos simplemente.

Agradecimientos

La autora desea expresar su gratitud a **md Diagnósticos**, quienes facilitaron la tecnología para la obtención de las imágenes de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON S. H., GANTZER C. J., BOONE J.M., TULLY R. J. (1988). Rapide Nondestructive Bulk: Density and soil - water content determination by computed tomography. USA. Soil Sci.

LIN, H.S., K.J. McInnes, L.P. Wilding, C.T. Hallmark. (1996). Effective porosity and flow rate with infiltration at low tension into a well-structured subsoil. Trans. ASAE 39:131-135.

LUO L. (2009). Quantification of soil macropore network and its relationship to preferential flow

using combined x-ray computed tomography and breakthrough curve analysis. The Pennsylvania State University. 183 pag.

PACHEPSKY, Y., V. Yakovchenko, M.C. Rabenhorst, C. Pooley, L.J. Sikora. (1996). Fractal parameters of pore surfaces as derived from micromorphological data: Effect of long-term management practices. Geoderma 74:305-319.

PAPADOPOULOS A., BIRD N.R.A., WHITMORE A.P., MOONEY S.J. (2009). Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography. European Journal of Soil Science, 60: 360-368.

PETROVIC, A, M. (1982). Soil bulk density in three dimensions by computed tomography scanning. USA. Soil Science So. Of Am.J. 46:445-450.

PINZÓN A. (1999). Evaluación de la porosidad del suelo por medio de la estimación de fractales. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Chile. Medio magnético PINZÓN A. (2002). Evaluación de la porosidad del suelo por diferentes métodos. Suelos Ecuatoriales. 32:116-120

PINZÓN A. (2006). Apuntes sobre Física de suelos. Editorial Carvajal. Bogotá, 211 p.

TAINA I. A., HECK R., ELLIOT T. (2007). Application of X-ray computed tomography to soil science. A literature review, Canada. University of Guelph. Can. J. Soil Science 88: 1-20

WARNER G.S. (1990). Characterization of soil macropores by computed tomography. Ph.D Tesis. University of Minnesota.

TORRES M. LIZARAZO L (2007). Dinámica de grupos funcionales y actividad de la Fosfatasa de dos suelos Agrícolas del Departamento de Boyacá. Suelos Ecuatoriales. Soc Col Ci Suelo. 37 (1): 56-60.

TRASAR C., LEIROS M., SOTRES G. (2008). Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality Soil Biology and Biochemistry, 40 (9): 2146-2155.

XUYANG L., GENWEI CH (2008). Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in Abies fabri forest of subalpine, southwest China. Soil Biology & Biochemistry. 1-7pp.