

CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD EDÁFICA COMO INDICADOR DE LA CALIDAD FÍSICA DEL SUELO

Characterization of Soil Porosity as Indicator of Soil Physical Quality

José Luis González-Barrios^{1‡}, Guillermo González-Cervantes¹, Ignacio Sánchez-Cohen¹,
Armando López-Santos² y Luis Manuel Valenzuela-Núñez¹

RESUMEN

Este trabajo presenta la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo en la cuenca alta del río Nazas. Mediante técnicas de análisis de imagen se determina el tamaño y la forma de los poros que caracterizan el espacio poroso de superficies de bosque, pradera y semidesnuda por sobrepastoreo. La aplicación de criterios de calidad del suelo permite asociar los resultados de porosidad con las funciones potenciales del suelo como las de asegurar el almacenamiento y el transporte de agua. Los resultados muestran que la porosidad es mayor en las superficies de bosque y de pradera que en las superficies semidesnudas. Esto les permite potencialmente cumplir mejor la función de captar, almacenar y transportar agua hacia el interior del perfil. Los resultados muestran también que es necesario tomar precauciones para evitar que las superficies de suelo semidesnudas por pisoteo y sobrepastoreo del ganado bovino aumenten en extensión ya que disminuyen la porosidad del suelo y con ello su calidad física. Este estudio evidencia la importancia de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo y la utilidad de la técnica de análisis de imagen como herramienta de apoyo.

Palabras clave: criterios edafológicos, análisis de imagen, espacio poroso.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA INIFAP). kilómetro 6+500 margen derecha canal Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

[‡] Autor responsable (gonzalez.barrios@inifap.gob.mx)

² Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Apdo. Postal no. 8. 35230 Bermejillo, Durango, México.

Recibido: abril de 2010. Aceptado: septiembre de 2011.
Publicado en Terra Latinoamericana 29: 369-377.

SUMMARY

This paper presents the soil porosity as a soil quality indicator in the Nazas upper watershed. Image analysis techniques determine the size and shape of porosity that characterize soil surfaces of forest, grassland and semi-bare by cattle over grassing. Application of soil quality criteria allows to associate results of soil porosity with potential soil roles to ensure water storage and water transport. Results show that soil porosity is higher in forest and grassland surfaces than in semi-bare surfaces. This potentially allows to a better water caption, water storage and water transport into the soil profile. Results also show that caution should be taken to prevent semi-bare soil surfaces by over grassing and cattle trampling because they decrease soil porosity and soil quality. This work shows the importance of soil porosity as indicator of soil quality and the useful technique of image analysis as support tool.

Index words: soil criteria, image analysis, soil porosity.

INTRODUCCIÓN

La porosidad del suelo en los primeros centímetros de profundidad determina en gran medida la infiltración y el escurrimiento del agua que condiciona su transporte hacia niveles superficiales o profundos (Bruckler, 1998). El flujo de agua y aire en el suelo se realiza a través del espacio poroso condicionado por el tamaño, abundancia y distribución de poros (Bonneau y Levy, 1979). La porosidad debe ser considerada un indicador de la calidad del suelo por su capacidad para almacenar agua y permitir el intercambio fisicoquímico y biológico entre las diferentes fases presentes en el suelo (Karlen *et al.*, 1997; Sojka y Upchurch, 1999; Ruiz-Camacho *et al.*, 2009).

La calidad del suelo es definida por Doran y Parquin (1994) como la capacidad de un suelo para realizar

funciones importantes para el ecosistema y para el uso de la tierra; estas funciones tienen que ver con el soporte de la productividad biológica y con la calidad del ambiente que promueve la salud vegetal y animal (Ruiz-Camacho *et al.*, 2009). Las funciones del suelo que se asocian a su calidad incluyen: i) aceptar retener y liberar nutrientes y otros constituyentes químicos ii) aceptar, mantener y liberar agua hacia las plantas o hacia arroyos y ríos, o hacia acuíferos someros o profundos iii) promover y soportar el desarrollo de raíces vegetales iv) mantener acondicionado el suelo como hábitat biótico y v) responder al manejo del suelo y resistir a la degradación (Larson y Pierce, 1991).

La clasificación del espacio poroso, de acuerdo a sus características de conducción o de almacenamiento, se resumió en tres categorías: 1) porosidad sub-microscópica, con poros demasiado pequeños que imposibilitan el flujo continuo; 2) porosidad microscópica o capilar, con poros dados por la matriz del suelo y la estructura entre agregados, su morfología depende de la génesis y el uso del suelo; el tamaño de los poros es entre 15 y 30 μm ; 3) macroporosidad, con poros grandes que pueden tener como origen: la actividad microbiana, grietas, cambios volumétricos contracción-expansión del suelo y la labranza en el caso de suelos agrícolas (Bruckler, 1998). Los macroporos dependen mucho de la capa vegetal que cubre la superficie del suelo, así como de las condiciones climáticas (Tuller y Or, 2002; Kutilek, 2004; Pires *et al.*, 2008). La medición del espacio poroso puede realizarse con herramientas de microscopía y análisis de imagen en secciones delgadas de suelo (Bouma *et al.*, 1979; Bullock y Mc Keague, 1984; Sort y Alcañiz, 1999; González-Cervantes *et al.*, 2004a; Maragos *et al.*, 2004; Mooney *et al.*, 2007).

La perturbación del espacio poroso, provocada por una carga que supera la resistencia del suelo y produce el colapso de los poros, conduce a procesos de degradación edáfica, declinación productiva de los ecosistemas e impactos hidrológicos importantes (Li *et al.*, 2009; Muhammad y Rattan, 2009).

Las características morfológicas y volumétricas del espacio poroso en el perfil del suelo desempeñan un papel importante en el transporte y retención del agua; es por ello que el estudio de la porosidad edáfica tiene relevancia por su contribución a la captación y almacenamiento del agua en cuencas hidrológicas (Cécillon *et al.*, 2009).

El objetivo del presente trabajo fue determinar la porosidad edáfica como indicador de calidad física del suelo mediante técnicas de análisis de imagen.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica en la cuenca alta del río Nazas a 25° 30' N y 105° 35' O, en el estado de Durango, México; corresponde a una zona montañosa de origen volcánico en la Sierra Madre Occidental con una superficie de 18 321 km² con un rango de altitud de 1600 a 3200 m. El clima es semi-árido a sub-húmedo, con temperatura media anual entre 15.9 y 13.3 °C respectivamente y una precipitación media anual entre los 500 y los 900 mm (Descroix *et al.*, 2004). Las aguas de escurrimiento superficial son almacenadas temporalmente en la presa regional Lázaro Cárdenas (El Palmito) y se utilizan para abastecer a las áreas de riego ubicadas aguas abajo como la del distrito 017 de la Comarca Lagunera (Loyer *et al.*, 2000).

En la zona de estudio fueron seleccionadas tres superficies de suelo representativas de los espacios naturales o productivos (González-Barrios *et al.*, 2008) con el propósito de estudiar la porosidad del suelo. Estas superficies presentan las siguientes características:

1) bosque: superficie de suelo bajo bosque de pino-encino con mantillo tipo Mor, de acuerdo a la tipología de Duchaufour (1995), de 10 cm de espesor formado por abundantes acículas de *Pinus* spp. y hojarasca de *Quercus* spp. (González-Elizondo *et al.*, 2007), con un suelo Cambisol crómico (de acuerdo a la FAO, 1998).

2) pradera, superficie de suelo bajo pastizal predominante de *Bouteloua gracilis* (H.B.K.) Lag. ex Steud., con un mantillo tipo Mull, de acuerdo a la tipología de Duchaufour (1995), de 1 cm de espesor formado por restos de pasto moderadamente incorporados al suelo de tipo Cambisol crómico de acuerdo a la clasificación FAO (1998).

3) superficie de suelo semi-desnuda y compactada por el pisoteo y el sobre pastoreo de ganado bovino, de aspecto mineral sin mantillo evidente, con suelo Cambisol crómico (FAO, 1998). La carga animal en esta superficie es variable de un año a otro, pero llega a ser de hasta 1 cabeza por hectárea (1 unidad animal por hectárea; Anaya y Barral, 1995).

El suelo de los tres sitios, en términos edafológicos y geológicos, corresponde al mismo tipo, desarrollado

sobre roca volcánica de tipo riolita e ignimbrita (Tardy, 2004), con variantes en su superficie que pueden ser asociadas a su uso actual (González-Barrios *et al.*, 2008).

En cada sitio y a una profundidad de 0 a 15 cm se realizaron mediciones físicas y químicas: textura, densidad aparente, materia orgánica y carbonatos totales. Estas mediciones se llevaron a cabo para caracterizar los suelos de acuerdo a la metodología de Vergière (Bourrier, 1965; Hallaire y Cointepas, 1993) y de acuerdo al tamaño de los monolitos de suelo por procesar con el equipo disponible en laboratorio. Se obtuvieron muestras de suelo sin alterar (tres monolitos, por sitio, de forma cúbica con dimensiones de 15 × 15 × 15 cm en cada superficie) para analizar su porosidad en el laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP CENID-RASPA). Los nueve monolitos fueron sometidos a deshidratación mediante el desplazamiento del agua con acetona por 24 h, después fueron saturados con resina de poliéster (Scout-Bader Crystic) adicionando un pigmento fluorescente (Uvitex) a la luz ultravioleta (luz negra) para diferenciar espacios vacíos y material mineral del suelo (Murphy *et al.*, 1977). Una vez impregnada y solidificada la resina, los monolitos de suelo fueron seccionados horizontalmente (2, 3, 12 y 13 cm de profundidad) y sobre las superficies, previamente pulidas de cada sección, se tomaron imágenes digitales con luz blanca y luz ultravioleta para observar y cuantificar el espacio poroso con el método de análisis de imagen como lo hicieron otros autores para diferentes condiciones del suelo (González-Cervantes *et al.*, 2004a; López-Santos *et al.*, 2009).

Las imágenes digitales fueron obtenidas con una cámara Olympus con sensor óptico CCD (siglas en inglés de charge-coupled device) de 4.1 mega píxeles, iluminando las secciones pulidas de cada monolito con luz blanca y luz ultravioleta. Dos escalas de observación fueron tomadas en cuenta con las siguientes resoluciones espaciales: escala M1 para observar macroporos, con toma rectangular de 127 × 95 mm (12 065 mm²) a una resolución espacial de 56 µm por píxel; escala M2 para observar microporos (con microscopio estereoscópico ME) con toma rectangular de 13 × 10 mm (130 mm²) a una resolución de 6 µm por píxel. El tratamiento de imágenes se realizó con el analizador Image Pro Plus® v4.5 (Media Cibernética, Maryland, USA) en computadora personal, en el laboratorio de imagen del INIFAP CENID-RASPA.

La porosidad total de los suelos se estableció a partir de los valores de densidad aparente (ρ_d), que se obtuvieron utilizando el método volumétrico de la piscina (Descroix *et al.*, 1997). Para el cálculo de la porosidad total se utilizó la Ecuación 1.

$$\eta = 1 - (\rho_d/\rho_r) \quad (1)$$

Donde: η es la porosidad total (en porcentaje), ρ_d es la densidad aparente y ρ_r es la densidad real (2.65 g cm⁻³) medida con picnómetro.

Las características de los poros se definieron de acuerdo a dos parámetros morfológicos:

1) tamaño, expresado por el área de la sección de cada poro en la imagen utilizando la Ecuación (2). Los valores de este parámetro son agrupados en tres clases para cada escala en el Cuadro 1.

$$T = 4\pi \text{ área} \quad (2)$$

Donde: T es el tamaño (en mm²), área es la superficie de la sección del poro de acuerdo con Coster y Chermant (1985).

2) forma, expresada por un índice de alargamiento (I_a) que considera el área y el perímetro de la sección de cada poro en la imagen, aplicando la Ecuación 3 de acuerdo con Hallaire *et al.* (1997) que da origen a tres clases de formas reportadas en el Cuadro 2.

$$F = \text{perímetro}^2 / 4\pi \text{ área} \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características físicas y químicas que se determinaron en cada uno de los sitios de estudio se presentan en el Cuadro 3. Las clases texturales del suelo en los tres sitios son iguales a pesar de existir ligeras diferencias en la proporción de arena, limo y arcilla. En contraste, el contenido de materia orgánica (MO) y la densidad aparente son diferentes; ya que en

Cuadro 1. Tamaño de poro en las muestras de suelo.

Clases de poro	Escala	
	M1	M2
Grandes	T1: >10 mm ²	T4: > 0.1 mm ²
Medianos	T2: 10 a 2 mm ²	T5: 0.1 a 0.02 mm ²
Pequeños	T3: < 2 mm ²	T6: <0.02 mm ²

Cuadro 2. Forma de poro en las muestras de suelo.

Forma	Índice de alargamiento
Redondos	< 5
Alargados o fisuras	5 a 7
Irregulares	> 10

las superficies de bosque y de pradera se presentan altos porcentajes de MO (11.5 y 6.2%, respectivamente) asociados con valores bajos y moderados de densidad aparente (1.02 y 1.50 g cm⁻³, respectivamente). Por el contrario, en la superficie de suelo semidesnudo pisoteado y sobrepastoreado disminuye drásticamente la MO (1.4%) y se incrementa la ρ_d (1.80 g cm⁻³), lo cual está asociado a una compactación del suelo por el pisoteo del ganado bovino que comprime el horizonte superficial al transitar sobre la superficie del suelo. Así mismo, el ganado disminuye la cobertura vegetal y se reduce la fuente natural de MO para el suelo. Por otra parte, el contenido de carbonatos totales se mantiene siempre bajo para los tres tipos de superficie, lo cual es normal en estos suelos forestales donde predominan los materiales eruptivos como la ignimbrita, la riolita y la toba ácida que están generalmente libres de carbonato de calcio (Tardy, 2004). Sin embargo, en algunas geoformas de la cuenca alta del Nazas donde se conforman las antiguas calderas geológicas puede haber formación de carbonato de calcio lo cual da mayor estabilidad a la estructura del suelo (Henin *et al.*, 1970; Le Bissonnais y Gascuel-Oudou, 1998). Estos resultados proporcionan información cualitativa sobre la porosidad del suelo, sin embargo, no dan detalles suficientes sobre el tamaño y la morfología de los poros, como se presenta a continuación con las herramientas del análisis de imagen.

La Figura 1 presenta las imágenes binarias del espacio poroso del suelo en los cuatro niveles de profundidad de cada sitio estudiado. Un primer vistazo a los resultados de porosidad permite detectar la mayor

abundancia relativa de poros en las superficies de bosque y de pradera. En seguida se analizan y discuten con mayor detalle esas diferencias en base a la abundancia el tamaño y la forma de los poros de las treinta y seis imágenes procesadas.

Los perfiles de porosidad determinados a partir de la densidad aparente (Ecuación 1) y del análisis de imagen se muestran en la Figura 2, donde se constata que el espacio poroso en la superficie de bosque es superior (62% del volumen total) al de la superficie de pradera (43%) y éste último resulta mayor al de la superficie semidesnuda (32%). Los perfiles del suelo de bosque y de pradera muestran una distribución del espacio poroso con una tendencia similar: macroporos con rangos de 17 a 22% y de 16 a 23% respectivamente (escala M1); y microporos con rangos de 9 a 12% y de 10 a 13% respectivamente (escala M2). La porosidad sub-microscópica muestra un incremento a los 3 cm de profundidad como si este nivel correspondiera a la influencia máxima del mantillo que se incorpora a la estructura del suelo; o a la abundante presencia de raíces de pastos observados que penetran los agregados del suelo. En contraste con las condiciones antes descritas, la superficie de suelo semidesnuda muestra una macroporosidad muy reducida de 2 a 3 cm de profundidad (5% en la escala M1 y 9% en la escala M2) en favor de una porosidad sub-microscópica importante. Sin embargo, la macroporosidad aumenta ligeramente de 12 a 13 cm de profundidad a medida que se aleja de la superficie del suelo donde el efecto de compactación parece ser más marcado por el pisoteo del ganado bovino. Estos resultados de porosidad diferencial en el suelo son similares a los obtenidos por González-Cervantes *et al.* (2004b) en suelos sometidos al paso de maquinaria; o en condiciones naturales comparadas con prácticas de labranza (López-Santos *et al.*, 2009).

En la Figura 3 se muestran las distribuciones de frecuencia de los tamaños y formas de los poros a cuatro

Cuadro 3. Características del suelo a profundidad de 0-15 cm.

Superficie	Arena	Limo	Arcilla	Materia orgánica	Carbonatos totales	Textura	Densidad aparente
	----- % -----						g cm ⁻³
Bosque	76	16	8	11.5	2.58	Franco arenosa	1.02
Pradera	68	14	18	6.2	3.80	Franco arenosa	1.50
Semi-desnuda	82	6	12	1.4	5.97	Franco arenosa	1.80

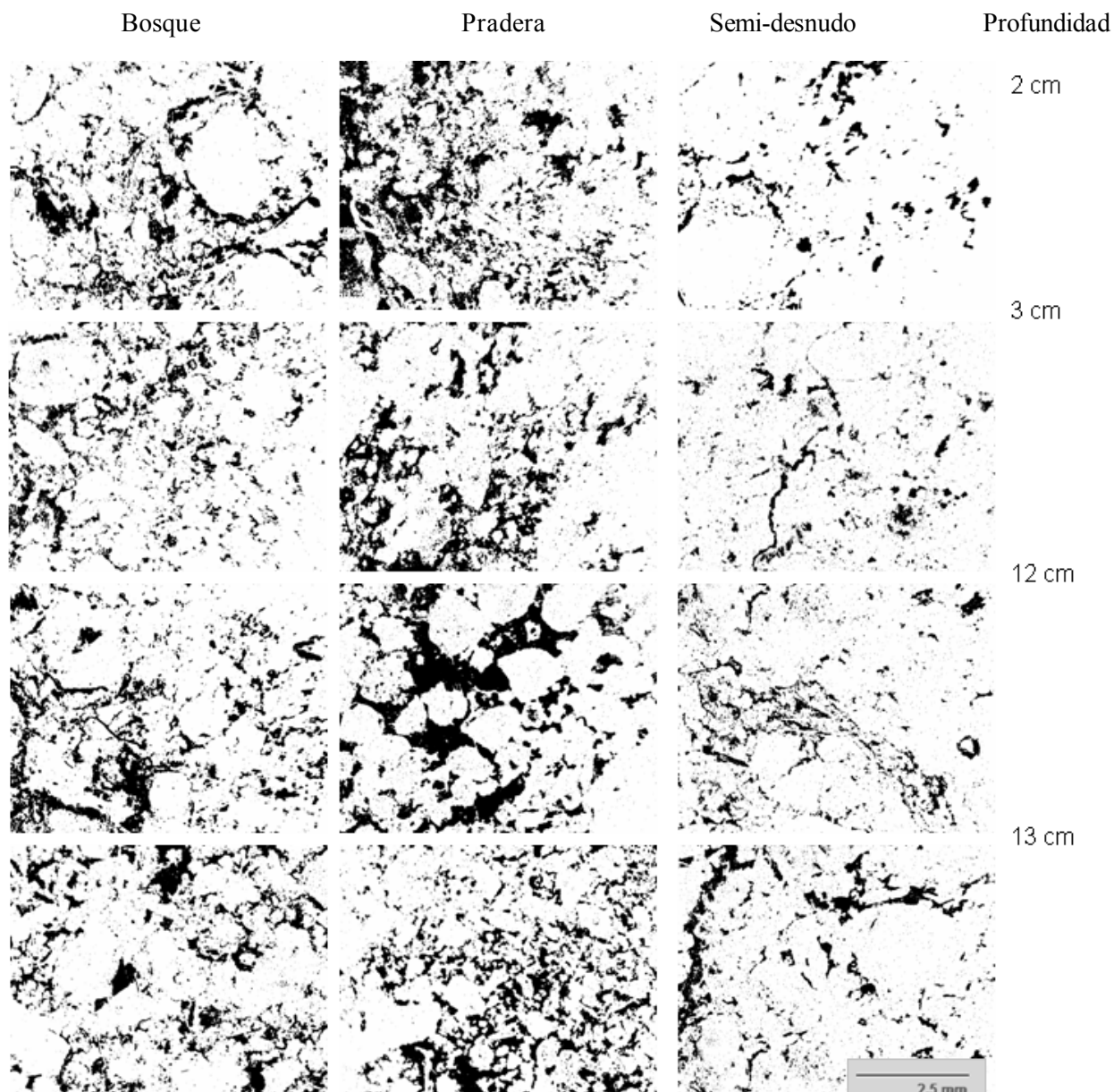


Figura 1. Morfología del espacio poroso del suelo a escala M2.

niveles de profundidad. Los histogramas presentan además seis barras verticales que corresponden a las seis clases de tamaño de poros (T1, T2, T3, T4, T5 y T6 presentados en el Cuadro 1) y que se dividen a su vez en tres subclases según la forma de los poros (redondos, alargados e irregulares). Se constató que la superficie de bosque y de pradera mostró un porcentaje mayor de macroporos T1 y T2 (poros grandes de más de 10 mm^2 y poros medianos de 2 a 10 mm^2 , respectivamente) que la superficie de suelo semidesnuda, especialmente en los tres primeros niveles de profundidad (2, 3 y 12 cm). Por el contrario, en la superficie de suelo semidesnuda

casi no existen macroporos (T1 y T2). La menor diferencia respecto a la porosidad se presenta en la clase de poros T3 (menores a 2 mm^2) que tiene una proporción casi constante en los tres tratamientos, pero con un ligero incremento en los niveles de estudio más profundos (12 y 13 cm). La microporosidad mediana y pequeña (T5 de 0.02 a 0.1 mm^2 y T6 menor a 0.02 mm^2) muestra también una proporción similar en las tres superficies de suelo, con una ligera diferencia entre los niveles profundos y superficiales del suelo semidesnudo. La clase de porosidad T4 (mayor a 0.1 mm^2) muestra una mayor proporción tanto en la superficie de bosque como en

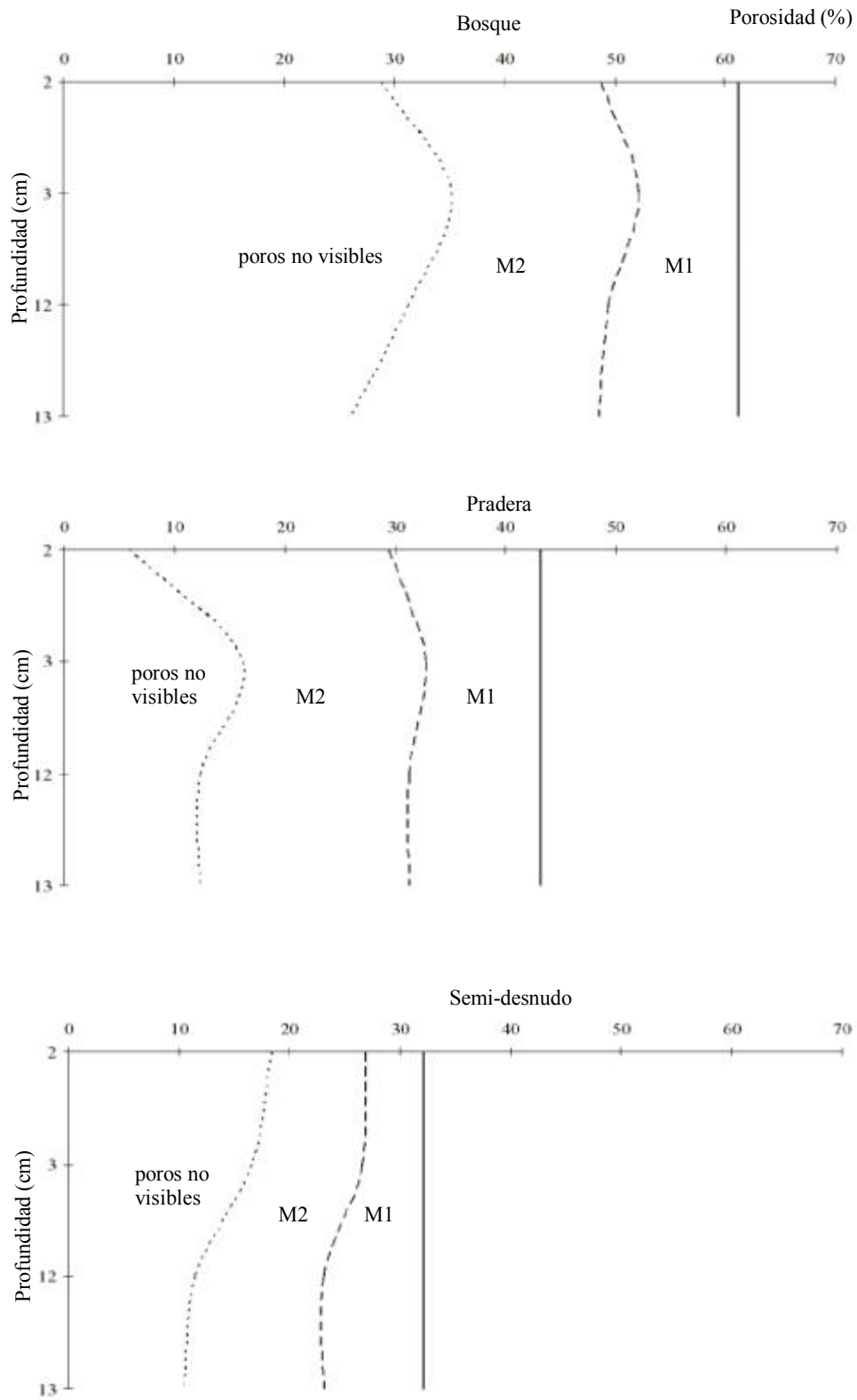


Figura 2. Distribución del espacio poroso en el suelo.

la de pradera, no así en la superficie semidesnuda donde el efecto del pisoteo del ganado parece disminuir este tipo de poros.

Se puede argumentar que la mayoría de los poros tienen forma irregular y redonda, y en menor proporción la forma alargada de acuerdo con el índice de alargamiento del análisis de imagen. Los poros con forma irregular se presentan principalmente en las clases de

tamaño T1, T2 y T4, es decir, los poros de mayor tamaño en ambas escalas (M1 y M2). Por el contrario, los poros de forma redonda dominan particularmente las clases de tamaño T3, T5 y T6, es decir, los poros de menor tamaño. Por su parte los poros de forma alargada se ubican con mayor frecuencia en las clases de tamaño T3, T4 y T5 con poros de tamaño mediano. Esta asociación de clases de forma y tamaño de poros

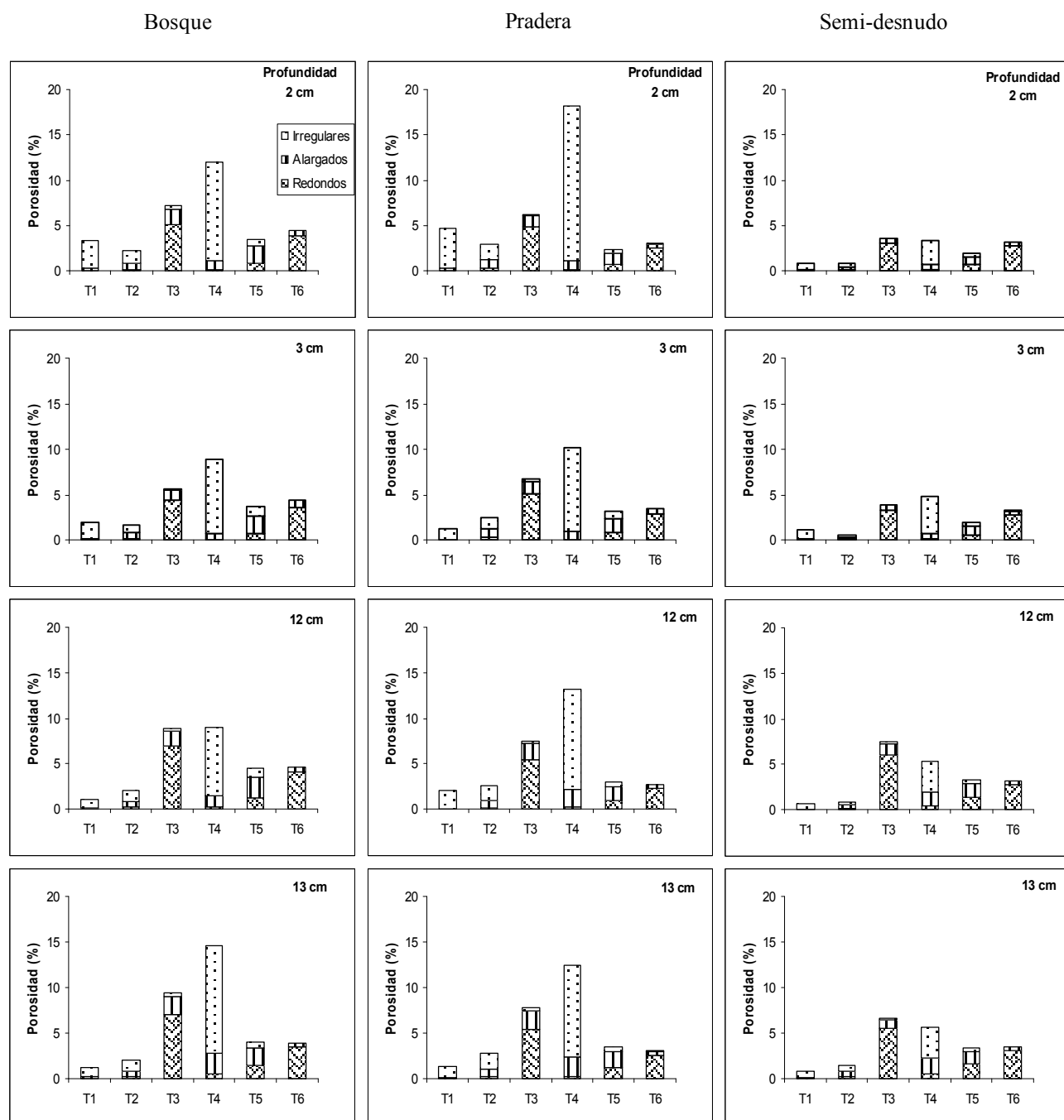


Figura 3. Histogramas de clases de tamaño y forma de poros.

es congruente con los resultados de otros autores (Hallaire y Cointepas, 1993; González-Cervantes *et al.*, 2004b; López-Santos *et al.*, 2009) que también utilizaron el método de análisis de imagen como herramienta para caracterizar la porosidad edáfica bajo diferentes condiciones del suelo.

Los resultados de este trabajo permiten resumir que los tres tipos de superficie de suelo estudiados muestran diferencias importantes respecto a sus porosidades y a la proporción, tamaño y forma de los poros. Estas diferencias condicionaran con toda seguridad el flujo del agua y solutos en el perfil del suelo en forma tanto vertical como lateral y eso con consecuencias hidrológicas y de transporte de contaminantes a nivel del perfil del suelo o de la cuenca vertiente que serían pertinentes de medir en trabajos futuros. Las técnicas del análisis de imagen utilizadas en este trabajo contribuyen a una mejor caracterización de la porosidad edáfica como un indicador de la calidad física del suelo de acuerdo a los criterios de Doran y Parquin (1994); Karlen *et al.* (1997); Sojka y Upchurch (1999), ya que las porosidades puestas en evidencia en los tres tipos de superficie de suelo darán a cada suelo un funcionamiento distinto respecto a su función de captar, almacenar y transportar el agua hacia el interior del perfil o hacia la superficie de la cuenca hidrológica.

CONCLUSIONES

- Las superficies de bosque y de pradera estudiadas presentan un espacio poroso parecido aunque la macroporosidad de ambas superficies esté asociada a factores diferentes. En la superficie de bosque la macroporosidad de forma irregular está asociada a un mantillo que provee gran cantidad de materia orgánica que proviene de las acículas de pino y las hojas de encino observadas; mientras que en la superficie de pradera dicha macroporosidad está asociada a las raíces de la vegetación herbácea (pastos y hierbas anuales observados) que penetran la superficie del suelo y sus agregados, lo cual facilita las condiciones de buena aireación y circulación del agua en el perfil del suelo. Por el contrario, la superficie de suelo semidesnuda por pisoteo y sobre pastoreo del ganado bovino presenta un espacio poroso bastante reducido y cerrado, compuesto en su mayoría por microporos de tamaño redondo, asociados a la matriz del suelo que deja ver un estado de compactación física.

- Las técnicas de análisis de imagen aplicadas en este estudio muestran las diferencias cualitativas y cuantitativas de la porosidad edáfica en los tres tipos de superficie estudiadas en la cuenca alta del río Nazas y permiten una buena caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo de acuerdo a la definición y criterios de Doran y Parkin (1994). Una mayor porosidad edáfica permitirá al suelo asegurar con mayor facilidad sus funciones de captar, almacenar y transportar el agua hacia las plantas y hacia las reservas de aguas subterráneas y superficiales que se presenten en las cuencas hidrológicas.

- Los resultados de este estudio muestran además que es necesario tomar las precauciones para evitar que las superficies de suelo semidesnudas por pisoteo y sobre pastoreo del ganado bovino aumenten en extensión ya que disminuyen la porosidad del suelo y con ello su calidad física. Las repercusiones hidrológicas de un aumento en tales superficies deben ser objeto de un mayor control de las actividades productivas en la zona; y de estudios finos de hidrodinámica superficial. Estos resultados son útiles para la toma de decisiones que contribuyan a proteger y mejorar la calidad física del suelo asegurando su función de captar, almacenar y transportar el agua de lluvia que recibe en la cuenca alta del río Nazas.

LITERATURA CITADA

- Anaya, E. y H. Barral. 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México. Folleto científico No. 5. Ediciones INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México.
- Bonneau, M. et G. Levy. 1979. Assemblage et organization physique des particules. pp. 234-250. In: M. Bonneau et B. Souchier (ed.). *Pédologie 2: Constituants et propriétés du sol*. Elsevier-Masson. Paris, France.
- Bouma, J., A. Jongerius, and D. Schoonderbeek. 1979. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay using micromorphometric data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 261-264.
- Bourrier, J. 1965. La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode Vergière. *Bull. Tech. Génie Rural.* 73: 112-124.
- Bruckler, L. 1998. Les transferts dans le sol. pp. 29-40. In: P. Stengel et S. Gelin (coord.). *Sol interface fragile*. Editions de l'Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Bullock, P. and M. C. Keague. 1984. Estimating air-water properties of a clay soil. pp. 55-67. In: *Comptes rendus du colloque fonctionnement hydrique et comportement des sols*. AFES. Dijon, France.
- Cécillon, L., B. Barthès, C. Gómez, D. Ertlen, V. Genot, M. Hedde, A. Stevens, and J. J. Brun. 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Eur. J. Soil Sci.* 60: 770-784.

- Coster, M. et J. L. Chermant. 1985. Précis d'analyse d'image. Centre National de Recherche Scientifique. Paris, France
- Descroix, L., J. F. Nouvelot, J. Estrada, y A. Gutiérrez. 2004. Espacialización de las precipitaciones sobre las dos vertientes de la Sierra Madre Occidental. pp. 133-144. *In*: L. Descroix, J. L. González-Barrios y J. Estrada. (eds.). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México.
- Descroix, L., P. Y. Guedez, et J. Poulencard. 1997. Méthodes de mesure de l'érosion actuelle: applications dans les Préalpes du Sud (France) et la Sierra Madre Occidentales (Mexique) *Bull. Rés. Erosion* 17: 239-254.
- Doran, J. W. and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 3-21. *In*: J. W. Doran. (ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special publication 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Duchauffour, Ph. 1995. Pédologie. Sol, végétation, environnement. Elsevier-Masson. Paris, France.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1998. World reference base for soil resources. World Resources Report No. 84. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- González-Barrios, J. L., J. P. Vandervaere, I. Sánchez-Cohen, G. González-Cervantes, and L. Descroix. 2008. Infiltration assessment for better watershed management in northern Mexico. pp. 138-147. *In*: IWRA (ed.). Transactions of the 13th World Water Congress. Montpellier, France.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen y J. P. Rossignol. 2004a. Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ing. Hidrául. Méx.* 19: 15-23.
- González-Cervantes, G., I. Sánchez-Cohen, D. García-Arellano. 2004b. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. *Terra Latinoamericana* 22: 297-287.
- González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, M. Márquez-Linares. 2007. Vegetación y ecorregiones de Durango. Plaza y Valdez Editores. México, D. F.
- Hallaire, V. et J. P. Cointepas. 1993. Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. *Etu. Gest. Sols* 13: 155-164.
- Hallaire, V., P. Curmi, et J. Widiatmaka. 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en zone saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etu. Gest. Sols* 42: 115-126.
- Henin, S., R. Grass, et G. Monnier. 1970. Le profil cultural. Elsevier-Masson. Paris, France.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Kutílek, M. 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Tillage Res.* 79: 175-184.
- Larson, W. E. and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. pp. 175-203. *In*: Int. Board Soil Res. Manage. J. Dumaski, E. Pushparajah, M. Latham, and R. J. K. Myers (eds.). Evaluation for sustainable land management in the developing world. IBSRAM Proceedings Vol. 2. Chiang Rai, Thailand.
- Le Bissonnais, Y. et C. Gascuel-Oudou. 1998. L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré. pp. 129-144. *In*: P. Stengel et S. Gelin (coord.). Sol interface fragile. Editions de l'Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Li, Y. X., J. N. Tullberg, D. M. Freebairn, and H. W. Li, 2009. Functional relationships between soil water infiltration and wheeling and rainfall energy. *Soil Tillage Res.* 104: 156-163.
- López-Santos, A., G. González-Cervantes, M. Cadena-Zapata, J. L. González-Barrios, J. G. Arreola-Ávila, and J. S. Rodríguez López. 2009. Changes in the porosity of tillage in a grassland ecosystem. pp. 1-9. *In*: ISTRO (ed.). Proceedings of the 18th Triennial Conference. T4-003. Izmir, Turkey.
- Loyer, J. Y., J. Estrada, L. Descroix y J. L. González-Barrios. 2000. Uso y manejo del agua en las cuencas hidrográficas del norte de México. Folleto científico No 12. Ediciones INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México.
- Maragos, P., A. Sofou, G. B. Stamou, V. Tzouvaras, E. Papatheodorou, and G. P. Stamou. 2004. Image analysis of soil micromorphology: feature extraction, segmentation, and quality inference. *EURASIP J. Appl. Signal Proc.* 6: 902-912.
- Mooney, S. J., C. Morris, J. Craigon, and P. Berry. 2007. Quantification of soil structural changes induced by cereal anchorage failure: Image analysis of thin sections. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170: 363-372.
- Muhammad, A. and L. Rattan. 2009. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil Tillage Res.* 103: 364-372.
- Murphy, C. P., P. Bullock, and R. H. Turner. 1977. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. *J. Soil Sci.* 28: 498-508.
- Pires, L. F., A. M. Cásaro, K. Reichardt, and O. S. Bacchi. 2008. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. *Soil Tillage Res.* 100: 72-77.
- Ruiz-Camacho, N., E. Velásquez, A. Pando, T. Decaens, et F. Dubs. 2009. Indicateurs synthétiques de la qualité du sol. *Etu. Gest. Sols* 16: 323-338.
- Sojka, R. E. and D. R. Upchurch. 1999. Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1039-1054.
- Sort, X. and J. M. Alcañiz. 1999. Modification of soil porosity after application of sewage sludge. *Soil Tillage Res.* 49: 337-345.
- Tardy, M. 2004. Elementos de geología de la Sierra Madre Occidental: constitución y origen. pp 19-24. *In*: L. Descroix, J. L. González-Barrios, J. Estrada. (eds.). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México.
- Tuller, M. and D. Or. 2002. Unsaturated hydraulic conductivity of structured porous media. *Vadose Zone J.* 1: 14-37.