



*Instituto de Ciencias
Aplicadas y Tecnología*



Informe Técnico

**Herramientas Computacionales para Análisis
Morfométrico de Galerías de Lombriz en Imágenes
Tomográficas de Muestras de Suelo,
*Versión 1***

Autores

**Jorge Alberto Márquez Flores
Alfonso Gastelum Strozzi
Blanca Prado Pano**

Noviembre 2018

Tipo de Proyecto

Financiamiento interno

Resumen

En este trabajo reportamos aspectos técnicos y científicos de un proyecto que consistió en el estudio de galerías de lombrices de tierra, en muestras de suelo de Tabasco, usando métodos de procesamiento y análisis digital de imágenes de tomografía computarizada en tres dimensiones (3D). Aparte de las propiedades bioquímicas y edafológicas de los suelos y las biomásas estimadas de las lombrices, nuestro grupo se interesó por rasgos de las galerías que dejan las lombrices a su paso: forma, orientación y otras características. Describimos la extracción y reconstrucción tridimensional de las formas de tales galerías, a partir de las imágenes de tomografía de un monolito de muestra de suelo. Se hizo un análisis computacional de *componentes conexas*, un procedimiento de etiquetado para identificarlas individualmente y se calcularon los siguientes parámetros morfológicos: volúmenes de cada componente de la galería, superficies, radios promedios y ejes principales de cada galería, así como la varianza en tales medidas, factores de forma 3D, tales como compacidad, centroides respecto al monolito, elipsoide que mejor ajusta, sus excentricidades, y vectores de orientación en 3D, así como su distribución y orientación dominante. Se estudió también la distribución (histograma) de cada parámetro y el denominado "conjunto estrella" de las distancias relativas entre cada galería y sus vecinos más cercanos, así como promedios globales y desviaciones estándar de cada parámetro. Se observó evidencia de cierta orientación dominante, pero la muestra resultó demasiado pequeña para asignar un valor p significativo a tal observación. Presentamos algunos resultados numéricos y su distribución a través de *imágenes paramétricas* y métodos de visualización científica. Se esperaría, en futuros estudios con muestras más significativas, que diferentes especies de lombrices o condiciones edafológicas y tipos de suelo se correlacionen con la morfología de las galerías y se exploren otros descriptores que proporcionen información adicional y caractericen mejor estas estructuras y su distribución.

Índice

Introducción	3
1 Materiales	3
2 Técnicas de Adquisición y Procesamiento Digital de Imágenes CT	4
3 Descriptores Morfológicos	8
4 Validación	10
5 Resultados	11
Conclusiones	15
Referencias Bibliográficas	16

Introducción

En los estudios de propiedades edafológicas, físico y bioquímicas de muestras de suelo, es importante la biomasa de las lombrices de tierra, o sea, su cantidad, entre otras propiedades de difícil medición. El uso de pesticidas, con el fin de satisfacer demandas productivas de alimentos, afecta la fauna, y en particular a las lombrices, que a su vez promueven la porosidad y movilidad del agua, o de nitratos (Bouché y Addal, 1997; Edwards, *et al*, 1989; Tomlin *et al*, 1995); en particular en México se han realizados estudios de diversas contribuciones de las lombrices a los ecosistemas (Huerta *et al* 2011). Es además necesario conocer mejor los efectos de pesticidas y otras condiciones de tratamiento de suelos sobre la fauna y para ello se han hecho estudios de restos de materia orgánica (Huerta *et al*, 2013), y relaciones entre la actividad de los gusanos de tierra y el sistema de redes de poros del suelo (Lavelle, 1988); en particular es de interés el número de *galerías* (llamadas en inglés *borrows*) de lombrices en diferentes condiciones (Pérès *et al*, 2010).

En años recientes, la dificultad de estudiar al menos las galerías de lombrices, ha sido resuelta mediante el uso de técnicas no invasivas para visualizar el interior de muestras de suelo, mediante imágenes de tomografía computarizada (CT), permitiendo la reconstrucción tridimensional de estructuras porosas, algunas de las cuales corresponden ya sea al paso de las lombrices, o bien, a las galerías o cavidades donde permanecen inactivas por días o semanas; en principio se sabe que los túneles que dejan son temporales y en su mayoría se colapsan, al paso de las lombrices. Las cavidades se pueden distinguir por dos propiedades de forma: son esferoidales o casi helicoidales y contienen una o más "piedrecillas", llamadas *turrícula*, consistentes en materia fecal y tierra compactada (Kobel-Kamparski y Lamparski, 1987, Huerta *et al*, 2013). Gracias a estos rasgos nos fue posible identificar los contornos de poros compactos conteniendo *turrícula* en imágenes de CT. Los resultados científicos del estudio, comprendiendo análisis edafológico e interpretación de las mediciones de acuerdo a las muestras y tipo de suelo, se reportaron en Prado *et al*, 2016. En este informe detallamos las técnicas de imagenología 3D y de análisis morfométrico diseñadas y programadas para el estudio de las cavidades ya descritas.

1 Materiales

Las cavidades o galerías de los gusanos fueron reconstruidas en computadora, a partir de secuencias de imágenes axiales de CT de columnas (o *monolitos*) de muestras de suelo, extraídas de parcelas seleccionadas y excavadas en bloques prismáticos de 300 mm de largo y 120 mm de ancho y profundidad. El tratamiento para el estudio edafológico y de experimentos de desplazamientos, son presentados en Prado *et al*, 2016 y aquí describimos sólo los aspectos concernientes al estudio morfológico. Es de notar que dichos tratamientos y experimentos alteran un poco las estructuras porosas

naturales del suelo, pero no aquellas de las cavidades de interés, dado que cada una se encuentra naturalmente endurecida por la estancia temporal de los gusanos (Kobel-Kamparski y Lamparski, 1987). Para mayores detalles sobre el tipo de suelo, los monolitos y el estudio edafológico y de transporte, consultar la misma referencia.

2 Técnicas de Adquisición y Procesamiento Digital de Imágenes CT

Los monolitos de suelo fueron utilizados en tres tipos de estudio: análisis edafológico, arriba mencionado, análisis de porosidad (ver Prado *et al* 2009 y Gastelum *et al*, 2010) y la morfometría 3D de las galerías de lombrices que detallamos en este trabajo. La adquisición se efectuó con un escáner helicoidal de tomografía computarizada para medicina, marca Philips, modelo *Precedence 16P*, instalado en la Unidad de Imágenes Cerebrales del Instituto Nacional de Psiquiatría "Ramón de la Fuente Muñiz". La obtención de imágenes que no son de personas o animales conlleva limitaciones y problemas que debimos resolver, comenzando por el protocolo de adquisición, que requiere ajuste de parámetros distintos a los utilizados en clínica; para esto, un físico médico especializado en imágenes de CT y Resonancia Magnética orientó al técnico, único autorizado a operar el equipo CT, y debimos experimentar hasta obtener imágenes con el menor ruido posible y el mejor contraste entre tierra (matriz de suelo) y poros, o las cavidades de interés (galerías de gusanos). La energía de rayos X seleccionada fue de 120 KV, con una exposición de 0.002 segundos, y un filtro de tipo "L" para optimizar resolución y contraste. Se obtuvieron 736 rebanadas con una resolución de 768x768 elementos de imagen (píxeles, en coordenadas de los ejes "X" y "Y") con una separación entre cortes de 0.35 mm (resolución axial o "eje Z"), píxeles de 0.35x0.35 mm y un atributo de densidad (vista como intensidad luminosa en la imagen tomográfica) de 16 bits (o sea, 2 bytes) de los cuáles sólo se ocupan 12 bits de intensidad para representar 4096 niveles. En la práctica el intervalo dinámico se redujo a 1565 niveles. En las imágenes CT las rebanadas tienen un espesor de 0.08 mm, así que cualquier detalle de variación menor es perdido al promediarse.

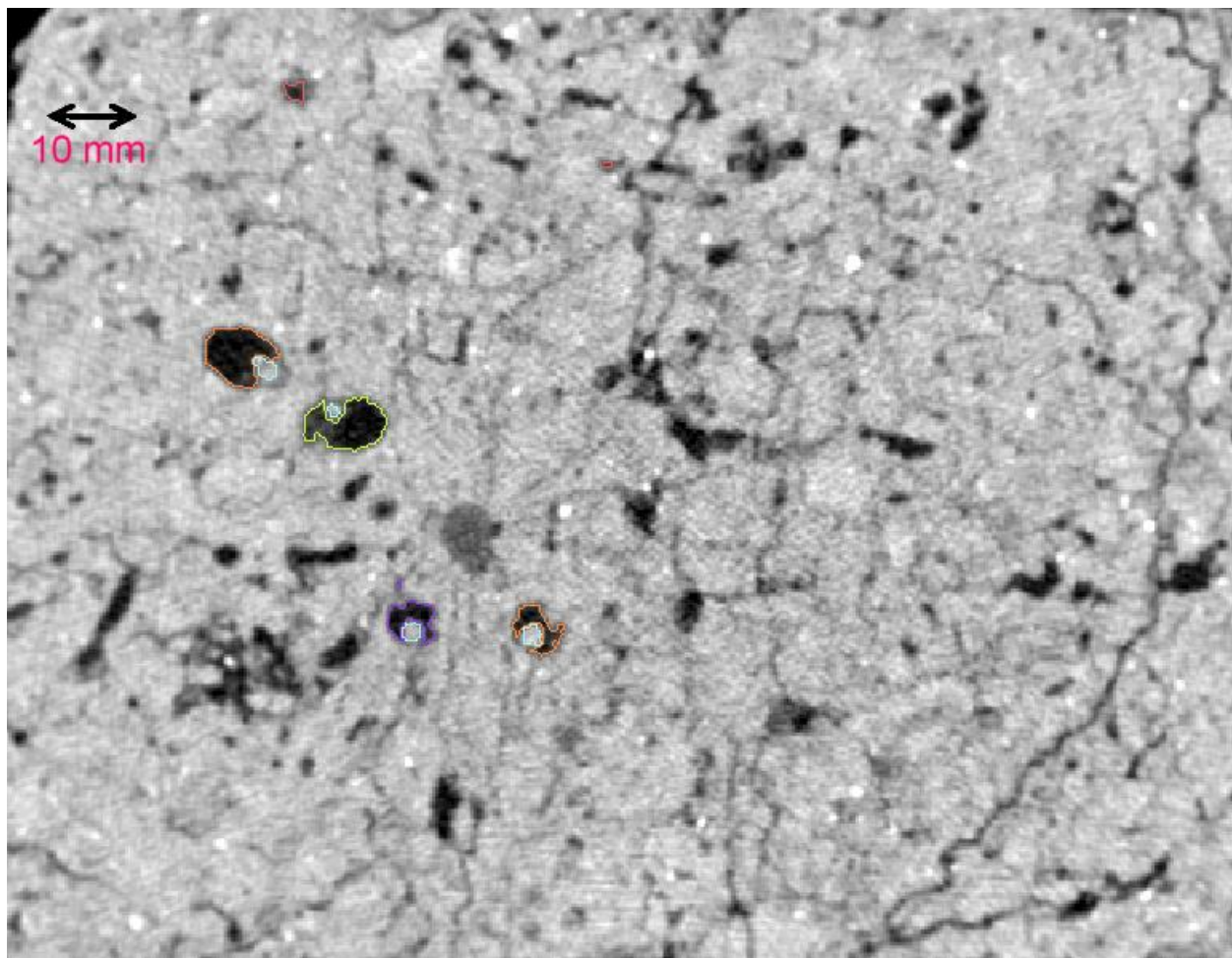


Figura 1. Un corte de uno de los monolitos de tierra; los contornos de color señalan secciones de las cavidades de forma aproximadamente elipsoidal en 3D; se distinguen claramente las piedecillas conocidas como turrículas, de mayor densidad (mayor intensidad en esta imagen), asociadas a cada galería. Son apreciables algunas grietas (ajenas a los poros) y artefactos de Moiré (líneas diagonales tenues), debido al ruido de la reconstrucción y efectos de muestreo. El color de cada contorno corresponde a etiquetas diferentes (componentes conexas individuales).

En un escáner de rayos X, a diferencia del tejido orgánico, la tierra en general contiene minerales que generan no sólo mayor opacidad que en un tejido blando, requiriendo mayor energía en el tubo de rayos X., sino además genera un ruido característico de la reconstrucción (Hui, 1999) y limita el espesor de las muestras. El ruido de submuestreo genera además artefactos conocidos como Moiré (Tabelow *et al.*, 2006) que dificulta y en algunos casos imposibilita la segmentación automática. Se logró reducir dicho ruido mediante un filtro anisotrópico y adaptativo (ver detalles en Tabelow *et al.*, 2006) y que se encuentra en el paquete de procesamiento de imágenes *ImageJ* de los National Institutes of Health (Schneider *et al.*, 2012). Dicho filtro suaviza texturas y ruido, respetando la nitidez de los bordes de, por

ejemplo, cavidades y las piedrecillas turrículas, cuyo tamaño es al menos dos veces mayor al ancho de los rasgos de los patrones de Moiré, cumpliendo con ello el criterio de muestreo generalizado de Nyquist-Shanon para poder filtrar los patrones de Moiré, sin afectar las turrículas.

La segmentación y etiquetado de componentes conexas tiene como objetivo identificar y aislar estructuras de interés; para ello se hace una distinción entre fondo y formas de interés; usualmente esto equivale a un proceso de binarización que, en su forma más simple, consiste en una separación por criterio de umbral de intensidad, pero en general este puede cambiar a lo largo del volumen, o tener poco sentido, al existir texturas tanto en el fondo como en la forma. Una manera de abordar esta situación, es mediante un método semiautomático e interactivo de crecimiento de regiones tridimensional, con una conectividad de 18 (por bordes); el mecanismo es similar al de llenado geométrico (*fill flood*, en inglés, ver Heckbert, 1990).

El carácter semiautomático e interactivo consiste en localizar, corte por corte, cavidades aproximadamente redondas, de al menos 2.5 mm de diámetro, y que rodean alguna partícula densa (intensidad cercana al máximo) de al menos 1 mm de diámetro promedio, equivalente a grupos de unos 8-9 píxeles. Tal partícula es la turricula característica de las cavidades de interés y que es formada por las lombrices que van tragando tierra conforma avanzan y la excretan compactada y con residuos orgánicos; la modelan y usan como soporte en torno al cual se enroscan. Varias cavidades o galerías pueden corresponder al paso y permanencia temporal de una sola lombriz. Adelante se mostrarán reconstrucciones donde se evidencia tal enrollamiento. Al localizar una cavidad en un corte, se proporciona al programa las coordenadas de un punto interior o "semilla" y el algoritmo de llenado en 3D etiqueta todos los voxeles en un intervalo de niveles de gris, tomando como límites aquellos voxeles que no pertenecen a tal intervalo y que constituyen el fondo de tierra. Se etiqueta además cada *turrícula* cuya densidad es mayor y presenta una diferencia aproximadamente constante de nivel de gris respecto al fondo de tierra. El efecto de *volumen parcial* (Marquez, 2016) produce algunos voxeles (vistos como píxeles en la imagen de cada corte) con valores intermedios, a veces reduciendo y a veces aumentando el volumen de la cavidad al extender hacia afuera o hacia adentro el contorno. La decisión de incluir tales voxeles produce una *sobresegmentación* y si se excluyen hay una *subsegmentación*. En general el resultado equilibrado combina los dos extremos y da la segmentación correcta, con un error de medio voxel, o sea la mitad del paso de discretización; la obtención de ambas variaciones permite además establecer un intervalo de incertidumbre, para cada descriptor morfológico. La segmentación como compromiso de dos valores extremos es muy parecida a la conocida como *segmentación por histéresis*, con un umbral que depende de la dirección de análisis (hacia dentro del objeto o hacia afuera, ver Canny, 1986), Además de las cavidades, se extrajeron las componentes conexas correspondientes a las

turrículas, aun si no había una galería asociada; en algunos casos podría haberse colapsado la cavidad o bien se trata de piedrecillas con una densidad muy similar.

La reconstrucción 3D y la visualización fueron realizadas con programas desarrollados en nuestro laboratorio y paquetes de software de dominio público, como Meshlab (MeshLab, 2009) e ImageJ (Schneider *et al.*, 2012); usamos además para procesamiento, morfometría y visualización, nuestro propio software, escrito en lenguaje C, usando las librerías de dominio público *Numerical Recipes* in C y VRML (*Virtual Reality Modeling Language*), que es un lenguaje para generación de gráficos (Rikk y Gavin, 1997) y es un formato aceptado en diversas plataformas como Meshlab, ya mencionado.

Los voxeles aislados, tras la binarización inicial, no son de interés en el estudio y fueron eliminados mediante filtros de morfología matemática (apertura y cerradura, principalmente, Serra *et al.*, 1994). La Figura 1 es una imagen tomográfica (corte) de un monolito conteniendo una muestra de suelo.

El proceso de segmentación semiautomática e interactiva consistió en recorrer por cortes el volumen y, en cada uno, se indicó un punto semilla por cavidad visualmente identificada, siempre que hubiera dentro alguna turrícula. Dicha cavidad, vista como un contorno por cada corte, fue etiquetada por el algoritmo de crecimiento de regiones en los cortes adyacentes, de modo que al pasar al corte siguiente, se contaba con menos rebanadas bidimensionales de cavidades sin etiquetar, acelerando el proceso de marcar puntos semilla. No importaba dejar pequeñas cavidades ya que estas, o bien formaban parte de galerías que aparecían claramente en cortes posteriores, o eran secciones de poros, grietas o de posibles túneles, aunque no hubo evidencia clara de que estos fuesen producto del paso de lombrices.

Las etiquetas asociadas a las componentes 18-conexas fueron: 0, para el fondo de tierra; entre 2 y 250 para galerías, como componentes conexas (nivel de gris cero o muy bajo en relación al fondo), habiendo encontrado 80 componentes conexas (cavidades) en la muestra de estudio; finalmente, el valor 254 fue asignado a las piedrecillas turrícula presentes en prácticamente todas las galerías de lombriz.

Para cada componente conexa (etiqueta n) se calcularon un conjunto de descriptores morfológicos (de forma) que detallaremos a continuación. Se obtuvieron promedios y desviaciones estándar de todos los descriptores, permitiendo caracterizar forma, tamaño, orientación y distribución espacial de las galerías y turrículas. La distribución espacial consiste inicialmente del valor de separación media entre cavidades, y del gradiente de densidad a lo largo de la columna, que en efecto corresponde a la observación de que las lombrices no suelen hallarse a profundidades mayores de 30 cm. En nuestro caso no se hallaron por debajo de unos 28 cm, en la muestra examinada.

3 Descriptores Morfológicos

Se obtuvieron diez descriptores significativos para caracterizar morfológicamente las galerías de las lombrices de tierra en el monolito bajo estudio:

1. **Volumen** V_n de cada componente conexa, $n=1, \dots, 68$ galerías, como el total de voxeles (cardinalidad) contenido en su interior, excluyendo las piedrecillas denominadas *turricula*.
2. **Area superficial** S_n de cada componente conexa, obtenida del mallado triangular (suma del área de cada faceta del mallado) ajustado al objeto discreto, usando las técnicas de *marching cubes* (Bloomenthal, 1994) y de suavizado iterativo, ambas herramientas del software *Meshlab*.
3. **Factor de forma** tridimensional (normalizado a 1.0 para una esfera), dado por la expresión:

$$F = 6V_n \sqrt{\pi} / S_n^{3/2} \quad (1)$$

4. **Tensor de inercia** $\mathbf{I}_n$, que es una aproximación de la matriz simétrica de covarianza de 3x3, cuyas entradas son los momentos de inercia de grado dos, a lo largo de cada eje coordenado (Crede, 1948):

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde los segundos momentos de inercia están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \frac{1}{\text{card}(V)} \sum_{(x,y,z) \in V} \left((y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 \right) \\ I_{yy} &= \frac{1}{\text{card}(V)} \sum_{(x,y,z) \in V} \left((x - x_C)^2 + (z - z_C)^2 \right) \\ I_{zz} &= \frac{1}{\text{card}(V)} \sum_{(x,y,z) \in V} \left((y - y_C)^2 + (x - x_C)^2 \right) \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned}
I_{xy} = I_{yx} &= \frac{1}{\text{card}(V)} \sum_{(x,y,z) \in V} (x - x_C)(y - y_C) \\
I_{xz} = I_{zx} &= \frac{1}{\text{card}(V)} \sum_{(x,y,z) \in V} (x - x_C)(z - z_C) \\
I_{yz} = I_{zy} &= \frac{1}{\text{card}(V)} \sum_{(x,y,z) \in V} (y - y_C)(z - z_C)
\end{aligned} \tag{3b}$$

siendo (x_C, y_C, z_C) el centro de masa (igual al centro geométrico, en el caso de las galerías), V el volumen de interés, y el operador $\text{card}(\cdot)$ es la cardinalidad (número de elementos) de un conjunto. Al diagonalizar la matriz $\mathbf{I}_n$ se obtienen tres eigenvectores que indican las direcciones de los ejes principales del elipsoide equivalente al objeto, cuya longitud está determinada por los eigenvalores λ_1 , λ_2 y λ_3 , numerados en orden de magnitud ascendente (son exactamente iguales en el caso de una esfera; si uno es cero, describen un disco o elipse plano y si dos son cero, describen una línea recta). A partir de los eigenvalores se definen los siguientes índices de isotropía; que son invariantes a escala, al ser adimensionales:

5. **Elongación:** $E = \lambda_2 / \lambda_1$ (4)

6. **Aplanamiento** (*flatness* en inglés): $P = \lambda_3 / \lambda_2$ (5)

7. **Anisotropía:** $A = 1 - \lambda_3 / \lambda_1$ (6)

Un valor de anisotropía igual a 0 corresponde a una esfera, que es perfectamente isotrópica.

8. **Orientación.** Los tres eigenvectores definen una orientación del elipsoide equivalente; suele tomarse el eigenvector correspondiente al eje mayor (eigenvalor λ_3) como la orientación dominante, aunque depende del estudio si son relevantes los otros eigenvalores.
9. **Distancia al vecino más cercano** Se obtiene de comparar todas las combinaciones de distancias, unas con otras. Pueden definirse descriptores más complejos de la distribución espacial, pero se considerarán en estudios futuros, dado que requieren de un número de muestras mayor, para tener un sentido estadístico significativo.
10. Adicionalmente, se tiene la **densidad de galerías**, que en nuestro caso, con un volumen de $18\,612.486\text{ cm}^3$, es de $68 / 18\,612.486 = 0.003\,7$ galerías por cm^3 .

4 Validación

Para verificar que los cálculos fuesen correctos se diseñó el siguiente mecanismo de validación:

1. Se formuló matemáticamente un elipsoide ideal, en espacio continuo $\mathbb{R}^3$ del cual se obtienen los valores morfológicos teóricos exactos mediante fórmulas conocidas (por ejemplo, el volumen del elipsoide es igual a $4/3 \pi abc$, con a , b , c los semiejes). Todas las mediciones son invariantes a posición y orientación (excepto los eigenvectores que determinan tal orientación, elegidos aparte y usados en el maniquí definido a continuación).
2. Se construyó un *maniquí* (o *phantom*) computacional del mismo elipsoide teórico, en un volumen discreto, mediante *voxelización implícita*; es decir, etiquetando aquellos voxeles que satisfacen la fórmula matemática del elipsoide ideal, de modo que las coordenadas discretas de cada voxel examinado se encuentran en el interior, incluyendo la frontera (interior geométrico).
3. Con el software Meshlab se obtuvo un mallado triangular que ajusta al volumen en voxeles. Esto permite extraer los descriptores sin la distorsión que ocasiona el artefacto de voxelización ("escaleras tridimensionales"), el cuál aumenta el valor de las mediciones de área superficial, en función de la irregularidad del objeto medido. Este mallado se usa también en la visualización y tiene la ventaja adicional de filtrar en forma implícita variaciones en los contornos debido a ruido, aunque en el caso de los maniqués elipsoidales no hay tal ruido.
4. Se aplicaron los programas de extracción de descriptores de forma sobre el volumen discreto del elipsoide voxelizado, tanto en voxeles como en su mallado triangular correspondiente, a una resolución mayor a la de las galerías de lombrices de las imágenes CT (por ejemplo, elipsoides de 20 por 30 por 40 voxeles).
5. Como existe una variación debida a cambios en orientación, se construyeron elipsoides a distintas orientaciones; en vez de rotaciones explícitas (llamadas "activas") sobre el elipsoide original, se transformaron las coordenadas que barren el volumen (rotaciones "pasivas") verificando su pertenencia al interior del elipsoide matemático; esto genera un elipsoide con la orientación complementaria y como reflejo especular a la deseada, lo cuál es irrelevante, pues las orientaciones son de todos modos aleatorias.
6. Con el programa Meshlab se construyeron mallados triangulares de cada elipsoide construido, para obtener descriptores morfológicos sobre superficies que se ajustan correctamente al modelo voxelizado, coincidiendo los volúmenes respectivos con aquel teórico y lo mismo para las áreas superficiales. El mallado así calibrado lo realiza automáticamente Meshlab.

7. Se hizo un análisis de errores respecto a los valores teóricos de cada descriptor morfológico. Como era de esperarse, el error resultó dependiente del error de cuantización al voxelizar; es decir, no mayor a la mitad de la diagonal mayor del voxel (o sea, $\pm 1/2$ de la raíz cúbica de $3 \times 0.35 \text{ mm} = \pm 0.51 \text{ mm}$). Desde luego, el proceso fue más largo y la validación permitió detectar un par de errores de programación que daban resultados muy similares. El tensor de inercia, por ejemplo, tenía originalmente eigenvalores invertidos.
8. Se variaron los parámetros del elipsoide original: semiejes, escalas y orientaciones, verificando las observaciones anteriores, al discretizar elipsoides con parámetros distintos y comparar los valores teóricos con aquellos obtenidos mediante las definiciones dadas en la Sección 3 y ecuaciones (1) a la (6), aplicados a los maniqués computacionales (los elipsoides voxelizados y sus respectivos mallados).

5 Resultados

La Figura 2 muestra las reconstrucciones 3D de las galerías segmentadas, con etiquetas identificadas por colores diferentes, aleatorios. Se observan las turrículas en color azul pálido. Aunque había cavidades muy cercanas entre sí, y algunas formas no elipsoidales (posiblemente un poro o grieta en contacto con la galería, como la color rojo, arriba a la izquierda y aquella en color cian, abajo al centro), prácticamente todas tienen forma casi esferoidal y se encuentran relativamente separadas, con una distribución uniforme, salvo un ligero gradiente de menor densidad al fondo del monolito (izquierda, pero fue cortado para destacar mejor las cavidades). Se pueden apreciar algunas turrículas aisladas; aunque podrían ser piedrecillas densas ajenas a las lombrices. También es posible que la galería correspondiente se haya colapsado en forma natural, o por manipulación humana de la muestra.

En la Figura 3 se muestran en detalle, mediante un montaje, algunas galerías. El montaje consistió en aproximar las galerías aisladas y resaltar algunos rasgos (v.g., mayor contraste). Es notable la traza de enrollamiento del cuerpo de una lombriz, tanto en unas turrículas como en la superficie de las propias galerías. Para una galería en particular, se muestran también los ejes principales superpuestos por claridad y con un factor de escala del doble para acentuar la orientación, de otro modo apenas se verían sólo las puntas de uno o dos ejes, quedando ocultos por el bulto de la galería los otros, más cortos.

La Figura 4 muestra solamente los ejes correspondientes a los eigenvectores de cada tensor de inercia, con un factor de escala de 2. No se observaron tendencias definitivas a, por ejemplo, una orientación respecto a la gravedad o el norte magnético, aunque la muestra es reducida. La regularidad de los tamaños y formas puede deberse a que las galerías podrían ser generadas por pocas lombrices,

inclusive una sola, que cambian de ubicación, pero no hay información en la literatura sobre esta posibilidad o sobre interacciones entre las mismas.

La Tabla 1 resume los valores medios de los descriptores morfológicos para las 68 cavidades detectadas y segmentadas de la muestra escogida para este reporte. En la referencia (Prado *et al*, 2016) se presentan resultados similares, obtenidos de otro monolito escogido para los experimentos de desplazamiento de agua, análisis bioquímico y simulación de flujos. No se reproducen los resultados ya reportados. Es de notar que como cuatro descriptores no tienen dimensiones, siendo resultado de cocientes, no se les puede asignar una incertidumbre adicional en mm, debido al error de cuantización. En el caso de las medidas dimensionales, la desviación estándar es significativamente mayor al error de cuantización, la cual determina la incertidumbre de los métodos. Esta no fue calculada en el presente estudio y resulta del análisis de propagación de incertidumbres a partir de las ecuaciones (1) a la (6)).

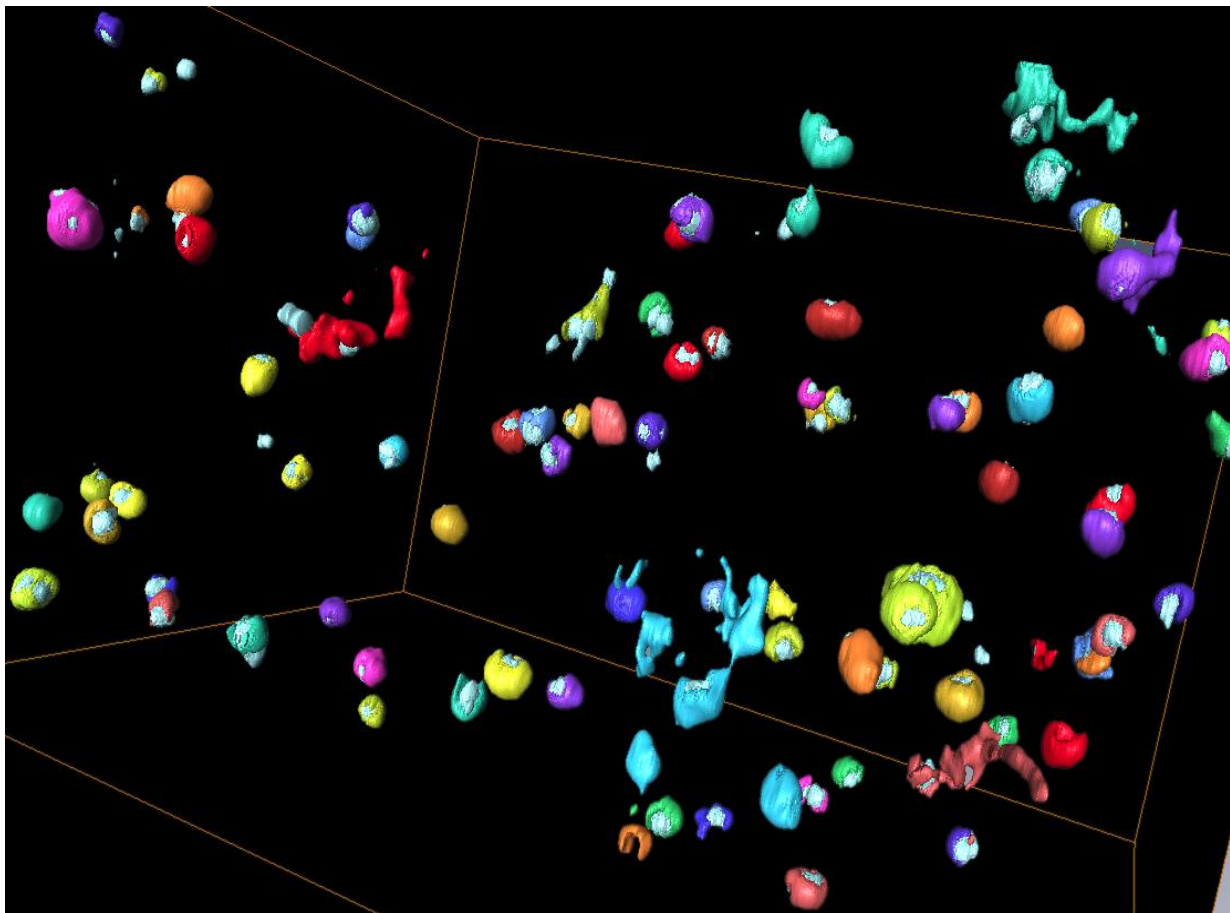


Figura 2. Resultado de la segmentación, reconstrucción tridimensional y etiquetado de componentes conexas. Se asignaron colores aleatorios, que podrían repetirse y sólo sirven para distinguir cada galería separada, sobretodo cuando están cercanas entre sí. Se aprecian las piedrecillas conocidas como turrículas en azul muy claro, rodeadas de las galerías. Se recuerda que lo negro es el fondo de tierra y

cada objeto en color es una cavidad, excepto las más claras, que son piedrecillas más densas que la tierra circundante. Unas cuantas aparecen sin cavidad y es posible que sean otro tipo de piedrecilla densa, o bien, la galería asociada se colapsó y no hubo nada qué segmentar en tales casos.

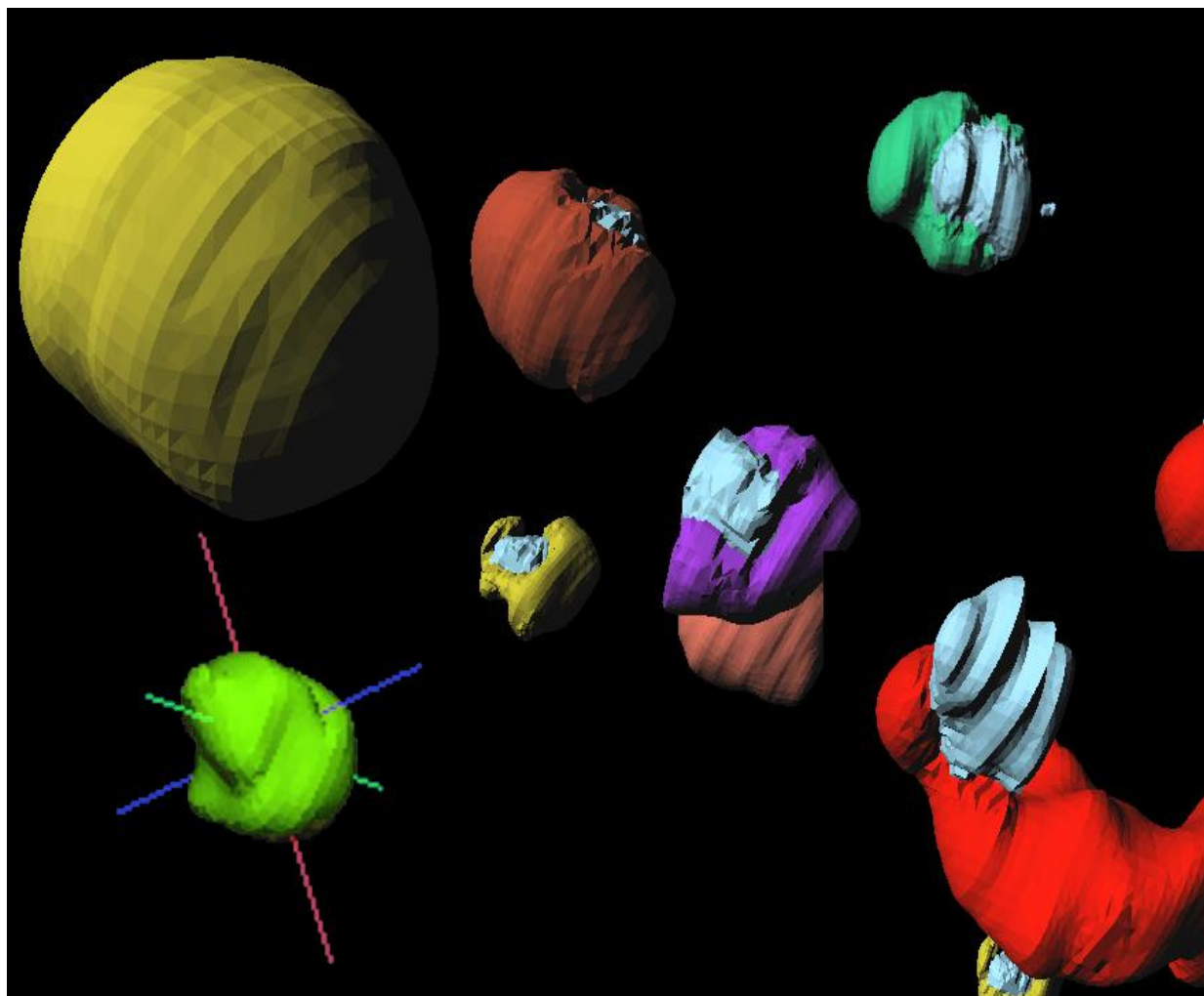


Figura 3. Detalle de las galerías (montaje realizado seleccionando y acercando algunas cavidades), en colores, excepto azul pálido, reservado para las turrículas. Casi todas muestran la traza de la lombriz que estuvo enrollada. Aunque no queda claro de la figura, la cavidad envuelve parcialmente a la turrícula. Abajo a la izquierda se muestran los ejes mayor (rojo), mediano (azul) y menor (verde) para una galería; por claridad su magnitud se duplicó para que resulten visibles, siendo más relevante las orientaciones y proporciones relativas.

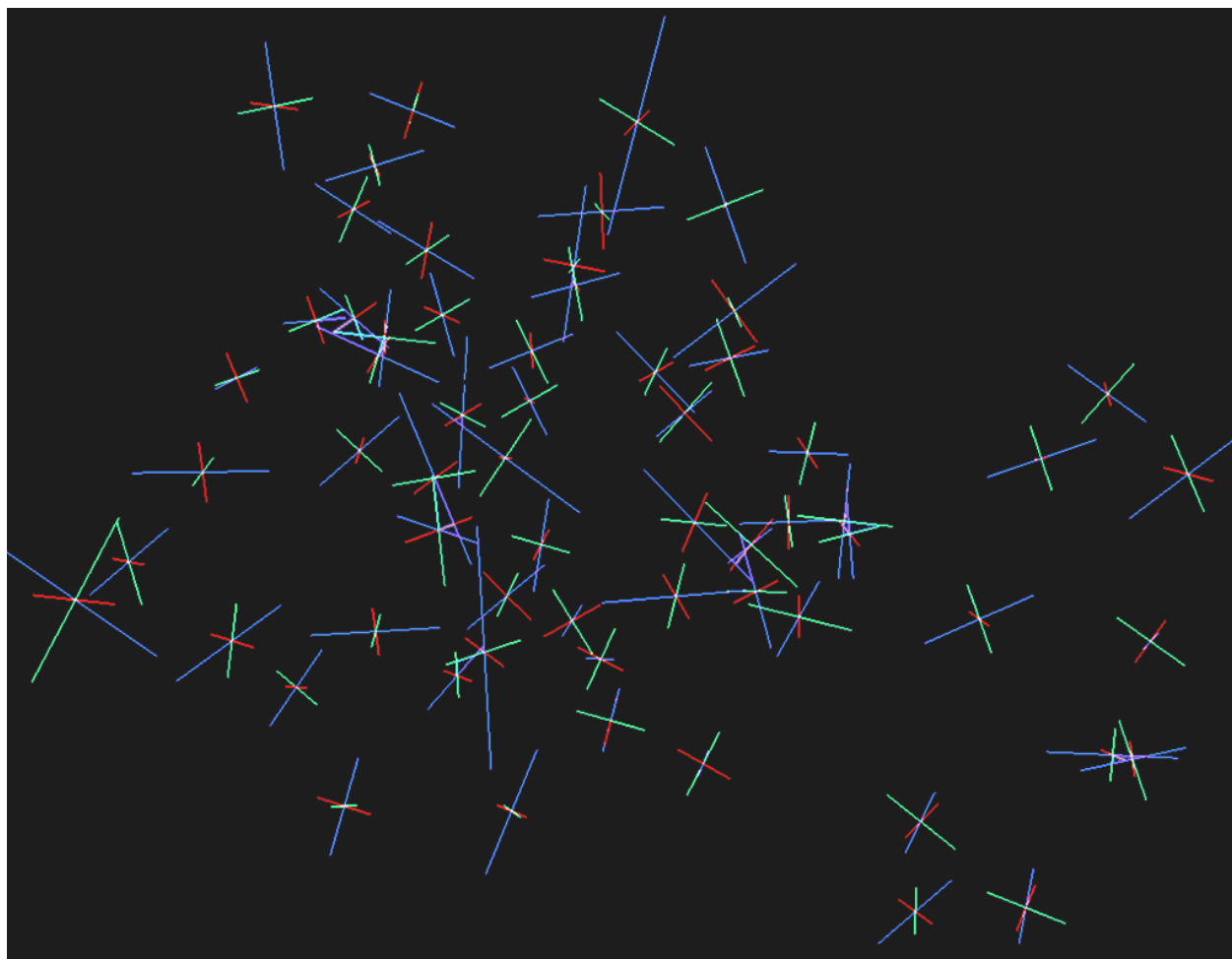


Figura 4. Distribución de los ejes (eigenvectores del tensor de inercia) de los elipsoides equivalentes a cada galería. Ejes mayor (rojo), mediano (azul) y menor (verde).

Descriptor	Volumen [mm ³]	Superficie [mm ²]	Factor de Forma [NA]	Elongación [NA]	Aplana- miento [NA]	Aniso- tropía [NA]	Orientación [ver Nota] ejes X,Y,Z	Distancia al vecino más cercano [mm]
Promedio	162.4	441.2	0.48	0.62	0.72	0.58	0.92, -0.18, 0.21	20.9
DesvStd	122.3	362.1	0.3	0,22	0.19	0.21	—	28.2

Tabla 1. Valores de los descriptores morfológicos de las 68 galerías detectadas en el monolito con una muestra de suelo donde hubo lombrices. El valor [NA] (No Aplica) indica que la medida es adimensional (por ejemplo, un cociente o proporción). Nota: La orientación se especifica como un vector normalizado en el intervalo $[-1,+1]$, por cada eje X, Y, Z.

Aunque se obtuvieron descriptores semejantes para las partículas turrículas, no resultaron por ahora de interés: En futuros estudios se discutirá con los interesados la exploración de más descriptores, de acuerdo a la interpretación que se pueda hacer de ellos y su sensibilidad a rasgos importantes.

Conclusiones

Se programaron y aplicaron diez descriptores morfométricos a imágenes de CT de muestras de suelo, donde se sabía de la presencia previa de lombrices de tierra, las cuales dejaron cavidades conocidas como *galerías*. Estas tienen forma elipsoidal, de baja anisotropía (o sea que son "esferoides"). Las mediciones son parte de un estudio más amplio que combina la física y bioquímica de la tierra de la muestra, su porosidad y características de las estructuras porosas; el estudio de las galerías permitirá evaluar los efectos de la presencia de dichos gusanos en la dinámica del suelo y el impacto de pesticidas u otras sustancias tóxicas para la fauna subterránea.

Es posible diseñar y programar otros descriptores de forma y distribución espacial o de rasgos morfológicos, de densidad, etc., así como las *imágenes paramétricas* respectivas; por ejemplo el mostrar una imagen de valores de volúmenes o de factores de forma (la paleta de color se asigna de acuerdo a la magnitud del descriptor), etc; permitiendo visualizar posibles gradientes o configuraciones significativas. Dos descriptores interesantes son el volumen y el factor de forma de la *zona de influencia* correspondiente a cada galería, sugiriendo una parcela o dominio establecido por cada lombriz. La obtención de estos y otros descriptores dependerá de poder obtener muestras específicas a estudios de suelo en diversas regiones, de acuerdo al interés agrícola, ecológico o edafológico en la biomasa, efectos de pesticidas, movilidad del agua y transporte de solutos en las mismas.

Referencias Bibliográficas

Bloomenthal, J. (1994) An Implicit Surface Polygonizer. En: Heckbert P., ed. **Graphics Gems, Volume IV**, edited by, Academic Press, p. 324-349.

Bouché, M., Addal Al. (1997) Earthworms, water infiltration and soil stability: Some new assessments. **Soil Biol. Biochem.** 29 3–4, p. 441–452

Canny J. A. (1986) Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 8(6), p. 679–698.

Crede, C. E. (1948) Determining Moment of Inertia, **Machine Design**, p. 138.

Edwards, W. M., Shipitalo, M. J., Owens, L. B., Norton, L. D.,. (1989) Water and nitrate movement in earthworm burrows within long-term no-till cornfields. **J Soil Water Conserv.** 44(3), p. 240-243.

Ehlers, W. (1975) Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. **Soil Sci.** 119(3), p. 242-249.

Fragoso, C. (2001) Las lombrices de Tierra de Mexico (Annelida, Oligochaeta): Diversidad, Ecología y Manejo. **Acta Zool. Mex.** Número especial. 1, p. 131-171.

Gastelum Alfonso, Delmas Patrice, Lefrancq Marie, Duwig Céline, Marquez Jorge, Prado Blanca, Gimel'farb Georgy, (2010) Visualising 3D porous media fluid interaction using X-ray CT data and Smooth Particles Hydrodynamics modelling, paper #249, **25th International Conference of Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ'10)**, Queenstown, New Zealand, 8-9 November 2010, Vol.25, p. 1-8.

Heckbert, P. (1990) A Seed Fill Algorithm. En: Glassner A., ed. **Graphics Gems**, Academic Press, p. 275-277, código fuente en p. 721-722.

Huerta, E., Brunet, D., Velazquez, E., Lavelle P., (2013) Identifying earthworm's organic matter signatures by near infrared spectroscopy in different land-use systems in Tabasco, Mexico. **Appl. Soil Ecol.** 69, p. 49 - 55.

Huerta, E., Prado, B., Marquez, J., Alcautier, S., Martinez-Gaudino, M.L., Rossi, J.P., Lavelle, P., (2011) How earthworms contribute to ecosystem services in Tabasco, Mexico. **Focus in Soil and Water Symposium**. Uppsala, Sweden, June 7-11.

Hui, H. (1999) Multi-slice helical CT: Scan and reconstruction. **Medical Physics**. 26(1), p. 5-18.

Kobel-Kamparski y Lamparski, (1987) Burrow construction during the development of *Lumbricus badensis* individuals. **Biol.Fert.Soils**. 3(1), p. 125–129.

Lavelle, P., (1988) Earthworm activities and the soil System. **Biol. Fert. Soils**. 6, p. 237-251.

Márquez Flores Jorge Alberto, (2016) Introducción a la Instrumentación y Señales: II. INFORMACION, DATOS, FUNCIONES, SEÑALES E IMÁGENES, Notas de curso, NC-INME-2016-460, CCADET, UNAM.

MeshLab, (2018) "MeshLab the open source system for processing and editing 3D triangular meshes". Disponible desde:<<http://meshlab.sourceforge.net>> [Acceso 10 de octubre 2018].

Pérès G., Bellido, A., Curmi, P., Marmonier, P., Cluzeau, D., (2010) Relationships between earthworm communities and burrow numbers under different land use systems. **Pedobiologia**. 54(1), p. 37–44.

Prado Blanca, Gastelum Strozzi Alfonso, Huerta Esperanza, Duwig Céline, Delmas Patrice y Marquez Jorge, (2016) 2,4-D mobility in two clay soils: impact of macrofauna abundance and soil functional groups, **Geoderma**, Volume 279, p. 87–96.

Prado Blanca, Duwig Céline, Marquez Jorge, Delmas Patrice, Morales-Puente Pedro, James Jason, Etchevers Jorge. 2009. Image processing-based study of soil porosity and its effect on water movement through Andosol intact columns. **Agricultural Water Management**, Elsevier, Vol. 96(10), p. 1377-1386.

Rikk, C., Gavin, B., (1997) The Annotated VRML 2.0 Reference Manual. Addison-Wesley Professional, ISBN-13: 078-5342419740.

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nat. Methods**. 9 (7), p. 671–675.

Serra, J.P., Soille, P., (1994) Mathematical morphology and its applications to image processing, Kluwer Academic Publishers.

Shipitalo, M.J., Nuutinen, V., Butt, K. (2004) Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil. **Appl. Soil Ecol.** 26(3), p. 209–217.

Tabelow, K., Polzehl, J., Voss, H.U., Spokoiny, V., (2006) Analyzing fMRI experiments with structural adaptive smoothing procedures. **NeuroImage** 33(1), p. 55-62.

Tomlin, A.D., Shipitalo, J.M., Edwards W.M, Protz, R., (1995) Earthworms and their influence in soil structure, En: Hendrix, P.F., (ed.), **Earthworms Ecology and Biogeography in North America**, 1th edition CRC Press Inc. p. 159-177.

Trigo, D., Barois, I., Gavin, M.H., Huerta, E., Irisson, S, Lavelle, P. (1999) Mutualism between earthworms and soil microflora. **Pedobiologia.** 43, p. 866-873.