



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES EN SUELOS
ARCILLOSOS Y DIFERENTES MANEJOS
AGRONÓMICOS: ANÁLISIS MULTI-ESCALA**

CARLOS ALBERTO TORRES GUERRERO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Carlos Alberto Torres Guerrero, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez C, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis: **Descomposición de raíces en suelos arcillosos y diferentes manejos agronómicos: multi-escala.**

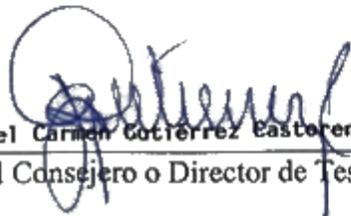
y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 21 de Noviembre de 2017



Firma del
Alumno (a)

*cbb.



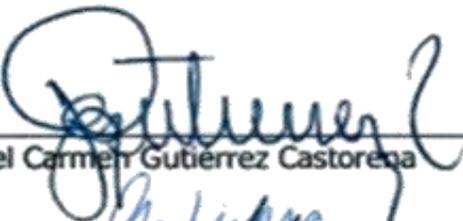
Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Descomposición de raíces en suelos arcillosos y diferentes manejos agronómicos; análisis multi-escala.**
realizada por el alumno: **Carlos Alberto Torres Guerrero**
bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y
aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

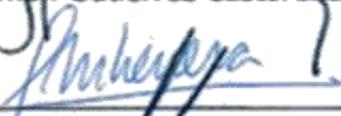
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)



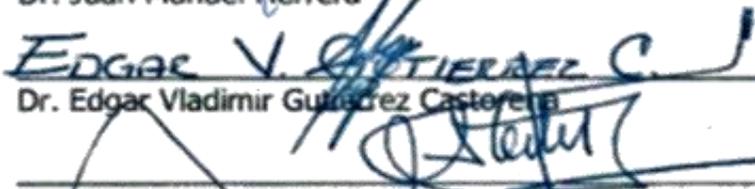
Dra. Ma. Del Carmen Gutierrez Castorega

ASESOR (A)



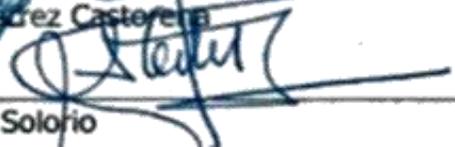
Dr. Juan Manuel Herrera

ASESOR (A)



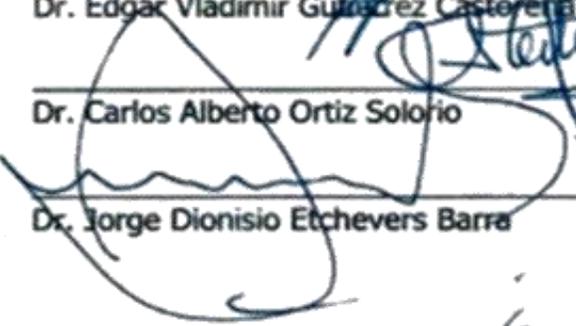
Dr. Edgar Vladimir Gutierrez Castorega

ASESOR (A)



Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

ASESOR (A)



Dr. Jorge Dionisio Etchevers Barra

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2017

DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES EN SUELOS ARCILLOSOS Y DIFERENTES MANEJOS AGRONÓMICOS: ANÁLISIS MULTI-ESCALA

Carlos Alberto Torres Guerrero, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

La producción y descomposición de las raíces son procesos fundamentales en el ciclo de nutrientes y la transformación de la materia orgánica del suelo. Además, son importantes en suelos arcillosos ya que intervienen en el desarrollo de la estructura del suelo. Otro factor es el manejo agronómico el cual puede magnificar o aminorar los efectos que provocan las raíces sobre la agregación. Para comprender los mecanismos de estos fenómenos es necesario abarcar múltiples escalas de observación (megascópicas o de paisaje) hasta microscópicas (análisis micromorfológicos) que ayuden a relacionar la magnitud exacta de cada proceso involucrado. Para ello fue necesario usar diferentes metodologías (clasificación campesina de tierras, núcleos de crecimiento interno, análisis de suelo y micromorfológico, operadores espaciales y análisis de imágenes en mosaicos de alta resolución). Los objetivos de esta investigación fueron: 1) Relacionar el conocimiento campesino del ejido Vega de Madero, Hidalgo con el manejo agronómico y la descomposición de las raíces; 2) Evaluar la producción y descomposición de las raíces y relacionarla con la estructura del suelo; 3) Comparar los métodos de análisis de imágenes usados comúnmente con el uso de mosaicos de alta resolución para cuantificar las raíces, poros y agregados del suelo, y 4) Evaluar el uso de imágenes con diferentes tipos de iluminación y la transformación de componentes principales para delimitar y cuantificar las raíces presentes en el suelo. Los resultados indican que la interacción entre el conocimiento local y técnico de suelo fue útil para ubicar geográficamente velocidades y tasas de descomposición de raíces con diferente manejo agronómico. El proceso es magnificado en suelos con altos contenidos hídricos y la rotación de cultivos. Al combinar ambos factores, las raíces son capaces de disgregar los agregados aumentando la abundancia de clases pequeñas (<10 mm) por efecto de la penetración de las raíces y a su vez la descomposición de las raíces aporta carbono orgánico que estabiliza los agregados. Además, la dinámica de agregación en suelos arcillosos es cíclica y esta modulada por el manejo agronómico. La combinación de diferentes escalas de observación y técnicas permitieron determinar los procesos relacionados con la descomposición de las raíces y su papel en la agregación del suelo.

Palabras clave: *tasa de mortalidad, mosaicos de alta resolución, clasificación campesina de tierras, núcleos de crecimiento interno, maíz, procesamiento digital de imágenes, suelos arcillosos*

ROOT DECOMPOSITION IN CLAY SOILS AND DIFFERENT CROP MANAGEMENT: MULTI-SCALE ANALYSIS

Carlos Alberto Torres Guerrero, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

Production and decomposition of roots are fundamental processes in nutrient cycling and the transformation of soil organic matter. In addition, they are important in clay soils due to they contribute to the development of the soil structure. Another factor to consider is the agronomic management that can magnify or lessen the effects caused by the roots of the aggregation. To understand the mechanisms of these phenomena it is necessary to cover multiple scales of observation (megascopic or landscape) to microscopic (micromorphological analysis) that help to relate the magnitude of each process involved. For this, it was necessary to use different methodologies (local land classification, ingrowth cores, soil and micromorphological analysis, spatial operators and image analysis in high-resolution mosaics). The objectives of this investigation were: 1) Relate local knowledge of the ejido Vega de Madero, Hidalgo with the agronomic management and the root decomposition; 2) Evaluate the production and decomposition of the roots and relate it to the structure of the soil; 3) Compare the common image analysis methods with the use of high-resolution mosaics to quantify roots, pores and aggregates of the soil, and 4) Evaluate the use of images with different kinds of illumination and the transformation of principal components for delimit and quantify roots in the soil. The results indicate that the interaction between local and technical knowledge of soil was useful to geographically locate speed and decomposition rate of roots with different agronomic management. The process is magnified in soils with high water content and crop rotation. By combining both factors, the roots are able to disintegrate soil aggregates increasing the abundance of small classes ($<1000 \mu\text{m}$) by the effect of root penetration and decomposition provides organic carbon that stabilizes the aggregates. In addition, aggregation dynamics in clay soils are cyclical and modulated by agronomic management. The combination of different observation scales and techniques allowed determining the processes related to the decomposition of roots and their role in soil aggregation.

Key words: *mortality rate, high-resolution mosaics, local land classification, ingrowth cores, maize, digital image processing, clay soils.*

AGRADECIMIENTOS

A los millones de ciudadanos que con sus impuestos vía el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) financiaron la realización de mis estudios.

A los habitantes del ejido Vega de Madero, Hidalgo y en especial a su comisariado ejidal Roberto García, por todas las facilidades brindadas para el trabajo en campo.

A la Dra. Carmen Gutiérrez Castorena por aceptar dirigir este trabajo de investigación, además, por su amistad y todas las horas de arduo trabajo en el aula como en la redacción final. Estoy infinitamente agradecido de encontrar en ella una persona llena de convicciones y que recuerda siempre que lo más importante son las relaciones humanas.

Al Dr. Juan Manuel Herrera por las aportaciones a este trabajo, por su amistad y todas las facilidades que me ofreció en mi estancia en Suiza y por permitirme conocer otras fronteras e interactuar con un grupo de investigación internacional. Además, por el financiamiento conseguido vía la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Argentina con el cual se pudo finalizar la fase de campo.

Al Dr. Carlos Ortiz Solorio por los comentarios siempre atinados y las muchas veces que me ayudo a aterrizar conceptos clave de esta investigación.

Al Dr. Edgar Gutiérrez Castorena por su ayuda en el análisis de imágenes y sus aportaciones a los artículos derivados de esta investigación.

Al Dr. Jorge Etchevers Barra por los comentarios y aportaciones para este trabajo.

Thanks to the Changins station of Agroscope (Switzerland) for allowing the research, stay in their laboratories especially to Didier Pellet and the Institut des sciences en production végétale. Merci beaucoup pour toutes vos attentions.

A la Dra. Natalia Palacios del Laboratorio de calidad de Maíz del CIMMyT y a todo su personal por permitirme realizar las cuantificaciones de nitrógeno en raíces.

A la coordinación del posgrado de Edafología en especial al Dr. Julián Delgadillo por facilitar los trámites administrativos para concluir mis estudios.

A Carmelita Bojorges por su amistad y toda la ayuda proporcionada en los trámites administrativos dentro del Colegio de Postgraduados.

A todo el personal del laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos, al M. en C. Patricio Sánchez Guzmán por sus consejos y conocimientos compartidos en campo y laboratorio. A mi “tío” Pedro Torres por los ratos en el simulador, a Juanito, Arturo Jiménez y los demás miembros del laboratorio.

A mis amigos del COLPOS que durante mi estadía compartieron momentos de felicidad y estrés a Enrique, Jhony, Stephanie, Esmeralda, Arturo, Tania, Steinger, Patricia, Chema y todos los que en algún momento del doctorado estuvieron apoyándome.

To all my international friends, thank you for all the parties in the Logis and for invite me to know all about Swiss and another countries culture. Thanks to Julienne, Francois, Adrian, Gael, Saeideh, Abdel, Mout, Lina, Charles and Caroline because you make very happy.

Al Dr. Juan Carlos Loaiza y a toda su familia por el recibimiento en España y sobre todo por compartir sus vivencias y consejos conmigo. Muchas gracias amigo.

DEDICATORIA

A mis padres Susana y Juan Carlos por ser parte fundamental de mi formación, gracias a ellos he podido cumplir muchas de mis metas. Por la educación y valores que me inculcaron, estoy seguro que antes que profesionista me hicieron humano y que la dignidad es lo más valioso que podemos atesorar.

A mi hermano Alejandro por ser siempre un ejemplo de perseverancia y dedicación, gracias por hacerme un hombre de ciencia y rebeldía. A mi cuñada Elsa por todo el apoyo brindado siempre y a mis sobrinos Raziel y Sebastián que alegran mi vida.

A la familia Brena Bustamante por abrirme las puertas de su casa, por hacerme sentir parte de ellos y por todas las alegrías y tristezas compartidas.

A Paulina gracias por estar, por construir y reconstruir, por reafirmar cada día nuestra convicción. Gracias por recordarme y ayudarme siempre a luchar por un mundo donde quepan muchos mundos. Sin tus pasos, los míos no son los mismos. Gracias por ser y vivir a mi lado.

TE AMO

Por último, quiero dedicar esta pequeña contribución a todas las personas que han sido víctimas de la violencia en nuestro país y a todos aquellos que luchan para que México sea un lugar de Paz. Siempre recordaremos que ¡nos faltan muchos más de 43!

IN MEMORIAM

Rosalba Hernández “La Yeya”

Bibiano Ramírez Vega

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I. REVISIÓN DE LITERATURA	4
Manejo agronómico de los Vertisols en México: una revisión.....	5
Clasificación campesina de tierras.....	21
Descomposición de raíces.....	25
Técnicas para cuantificar la descomposición de las raíces.....	31
Análisis de imágenes en secciones delgadas del suelo.....	33
CAPÍTULO II. DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES DE MAÍZ (<i>ZEA MAYS L.</i>) EN DIFERENTES CLASES DE TIERRA	45
CAPÍTULO III. LA DESCOMPOSICIÓN DE LAS RAÍCES Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA DEL SUELO: ANÁLISIS IN SITU Y MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN DE SECCIONES DELGADAS	64
CAPÍTULO IV. CUANTIFICACIÓN DE LA POROSIDAD, AGREGADOS Y RAÍCES EN SECCIONES DELGADAS DE SUELO: MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN <i>VERSUS</i> IMÁGENES AISLADAS	91
CAPÍTULO V. CUANTIFICACIÓN DE RAÍCES EN SECCIONES DELGADAS DE SUELO USANDO ANÁLISIS DE IMÁGENES Y TRANSFORMACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES	108
CONCLUSIONES GENERALES	125

LISTA DE CUADROS

Capítulo I

Cuadro 1. Principales investigaciones realizadas en Vertisols, en México..... 11

Cuadro 2. Principales investigaciones acerca del procesamiento digital de imágenes y su aplicación en micromorfología para la delimitación de los diferentes componentes del suelo..... 38

Capítulo II

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con las características descritas por los productores en las diferentes clases de tierras del ejido Vega de Madero, Hidalgo..... 52

Cuadro 2. Prácticas agronómicas y la percepción de la descomposición de las raíces en el ejido Vega de Madero, Hidalgo según los productores..... 53

Cuadro 3. Propiedades edáficas y clasificación de suelos de las diferentes clases de tierra..... 54

Cuadro 4. Valores promedio de algunos parámetros radicales de maíz en las diferentes clases de tierra del ejido Vega de Madero, Hidalgo en los ciclos de cultivo 2015 y 2016..... 59

Capítulo III

Cuadro 1. Clasificación y algunas propiedades físicas y químicas de los suelos presentes al momento de la siembra en las parcelas experimentales del ejido Vega de Madero Hidalgo..... 69

Cuadro 2. Parámetros radicales calculados en los núcleos de crecimiento interno y contenidos de humedad gravimétrica..... 73

Cuadro 3. Eigenvalores y porcentajes acumulativos del análisis de componentes principales de los mosaicos..... 76

Capítulo IV

Cuadro 1. Porosidad del suelo calculado a lo largo del ciclo de cultivo 2015 con técnicas convencionales (imágenes aisladas) y con mosaicos de alta resolución compuestos de imágenes secuenciales en los diferentes tratamientos..... 98

Cuadro 2. Porcentaje de agregados del suelo calculados en las fotografías aisladas y la su distribución obtenida en los mosaicos de alta resolución. Los agregados del suelo fueron divididos en diferentes categorías de acuerdo a su tamaño..... 102

Capítulo V.

Cuadro 1. Matrices de confusión, cálculo de la precisión global y del usuario y valores de brillantez (dominio espectral) de los componentes del suelo en las clasificaciones supervisadas en imágenes con un solo tipo de iluminación (LPP).....	115
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II.

- Figura 1. Localización del Ejido Vega de Madero en el territorio nacional..... 48
- Figura 2. Mapa de la velocidad de descomposición de raíces y las diferentes clases de tierra según los productores. Además, se muestra la ubicación de los pozos edafológicos y parcelas experimentales en el ejido Vega de Madero, Hidalgo..... 51
- Figura 3. Estructura del suelo: a) Tierra Barro Pardo; b) Barro con Tepetate Blanco; y c) Barro Negro..... 54
- Figura 4. Perfiles de suelos y su asociación con el paisaje de las diferentes clases de tierras..... 56
- Figura 5. Longitud de las raíces de maíz en descomposición en los tratamientos instalados en los ciclos de cultivo 2015 y 2016..... 61

Capítulo III

- Figura 1. Localización del ejido Vega de Madero, Hidalgo en el territorio nacional..... 68
- Figura 2. Secuencia seguida para la construcción de mosaicos en luz polarizada plana (LPP) a una magnificación de 2x (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016; 2018)..... 71
- Figura 3. Imágenes resultantes del análisis de componentes principales de un mosaico (a). El primer resultado son los tres componentes agrupados en una sola imagen (b) y posteriormente pueden ser visualizados por separado (c) para delimitar con mayor facilidad los componentes del suelo..... 71
- Figura 4. Procedimientos realizados para delimitar los componentes del suelo. Los recuadros grises representan resultados o imágenes obtenidas de un proceso y los recuadros blancos procesos llevados a cabo en ArcGis v.10.3..... 72
- Figura 5. Tasas de producción y mortalidad relativas de las raíces finas de maíz en el ciclo de cultivo 2015. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos..... 74
- Figura 6. Desarrollo secuencial de la estructura en los tratamientos ensayados en ciclo de cultivo 2015..... 76
- Figura 7. Proceso de aislación de componentes del suelo en los mosaicos mediante la transformación de componentes principales (b) donde se ocupan las varianzas de la imagen y se generan falsos colores, para realizar una clasificación no supervisada (c) y delimitar los componentes del suelo (d) con ayuda de la imagen real (a) y de ACP. Longitud del marco 11.054 mm..... 77

Figura 8. Distribución de las dos categorías de raíces finas (< 2mm) durante el ciclo de cultivo 2015 en el tratamiento colocado en Inceptisols.....	78
Figura 9. Distribución de las dos categorías de raíces finas (< 2mm) durante el ciclo de cultivo 2015 en el tratamiento colocado en Vertisols.....	79
Figura 10. Distribución porcentual de los componentes del suelo en los diferentes tratamientos experimentados durante el ciclo de cultivo 2015.....	80
Figura 11. Dinámica y distribución de las diferentes clases de agregados del suelo en el tratamiento de Inceptisols.....	81
Figura 12. Dinámica y distribución de las diferentes clases de agregados del suelo en el tratamiento de Vertisols.....	82
Figura 13. Desarrollo y transformaciones de los componentes del suelo en el tratamiento dónde se usó la rotación de cultivos en Vertisols.....	84
Figura 14. Imágenes en falso color correspondientes al análisis de componentes principales realizados a los mosaicos de alta resolución, donde se muestran el primero y segundo componentes principales (a), el primer componente (b) y el segundo componente (c).....	86

Capítulo IV

Figura 1. Localización del ejido Vega de Madero, Hidalgo en el territorio nacional.....	95
Figura 2. Proceso para la cuantificación del porcentaje de espacio poroso y agregados del suelo en imágenes aisladas de las secciones delgadas a una magnificación de 2x.....	97
Figura 3. Cuantificación de los componentes del suelo en el mosaico de alta resolución (a) y en tres imágenes aisladas para el tratamiento de monocultivo en Inceptisol en el mes de agosto.....	99
Figura 4. Distribución de agregados, poros y raíces en un mosaico de alta resolución (a) y cinco imágenes aisladas en el tratamiento con mayor cantidad de raíces (Vertisol + rotación) durante el mes de agosto.....	100

Capítulo V

Figura 1. Mapas temáticos de los componentes del suelo derivados de las clasificaciones supervisadas realizadas a imágenes capturadas en LPP. Longitud del marco 11.6 mm.....	116
Figura 2. Mapas temáticos de los componentes del suelo utilizando tres tipos de iluminación (LPP, LPX y LPXλ) y combinándolos con algebra de mapas para obtener la máxima birrefringencia y mínimo grado de opacidad (Gutiérrez-Castorena <i>et al.</i> , 2017). Longitud del marco 11.6 mm.....	119

Figura 3. Primer y segundo componentes principales de la TCP (izquierda) realizada a las imágenes con tres tipos de iluminación (LPP, LPX y LPXλ 45°) y mapas temáticos de las raíces en diferentes estados de descomposición. Longitud del marco 11.6 mm..... 122

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los suelos arcillosos del eje Neovolcánico Transmexicano son quizás los más productivos de la zona centro y bajío del país por su alta acumulación de nutrientes debido a su génesis, por lo que favorecen el establecimiento y crecimiento de cultivos de interés alimenticio para la región (maíz, frijol y avena principalmente). Sin embargo, la naturaleza expansible de las arcillas (2:1) y las limitaciones de hídricas en la mayoría de estas unidades de suelo complican su manejo agronómico en donde el crecimiento radical se ve afectado provocando la disminución de los rendimientos en cultivos.

Para preservar la calidad de los suelos de importancia agrícola, la producción y muerte de las raíces es un proceso fundamental que modula los cambios de la estructura. Específicamente en la agregación de las partículas es relevante analizar el efecto de la penetración de las raíces, la modificación del régimen hídrico en la zona rizosférica, la producción de exudados que actúan como agentes cementantes entre partículas de suelo, el entrelazamiento de agregados y la descomposición de raíces que inyectan C orgánico al suelo y secuestrando este elemento. No obstante, la producción y descomposición han sido examinadas por separado y en diferentes escalas de observación, por lo que las metodologías empleadas suelen no tener correlación y representatividad entre ellas ni entre diferentes escalas.

La alternativa para solucionar este problema es la realización de estudios que comprendan múltiples escalas de observación en un sitio y que los resultados de cada una puedan ser representativos y correlacionados entre sí para mejorar la gestión de los suelos arcillosos de origen volcánico de México.

En esta investigación fueron realizados cinco capítulos donde se usaron diferentes escalas de observación desde megascópica (paisaje, km) hasta microscópica (sección delgada de suelos, μm) utilizando diferentes técnicas para la

cuantificación de la producción y descomposición de las raíces con el fin de relacionar los resultados con la estructura del suelo.

Capítulo I. La revisión de literatura comprende la escala megascópica desde el manejo agronómico de los Vertisols en México, así como el estado del arte de las metodologías empleadas para correlacionar el manejo y la descomposición de raíces (clasificación campesina de tierras). Además, se consultaron las técnicas disponibles para evaluar la producción y descomposición de raíces y finalmente, una revisión sobre la delimitación y cuantificación de las raíces mediante el análisis de imágenes en secciones delgadas de suelo.

Capítulo II. En este capítulo se ocupan las escalas mega y macroscópicas al emplear la clasificación campesina de tierras y el uso de núcleos de crecimiento interno para correlacionar el conocimiento campesino del Ejido Vega de Madero, Hidalgo con el proceso de descomposición de las raíces. Los resultados indican que con el conocimiento popular campesino se puede reconocer de manera diferencial los diferentes tipos de suelos (clases de tierras). Los productores además identifican diferentes tasas de producción y descomposición de las raíces de maíz. Con el conocimiento de los productores se puede reducir considerablemente el tiempo que se emplearía si se trabajara bajo un esquema tradicional de levantamiento de suelos.

Capítulo III. La escala microscópica fue evaluada a través del análisis de imágenes en secciones delgadas de suelo. Mosaicos de alta resolución de secciones delgadas se construyeron y se delimitaron las raíces presentes en diferentes suelos arcillosos y manejos agronómicos. En esta parte se pudo apreciar la relación que las raíces guardan con la distribución y abundancia de agregados de diferentes tamaños. Los resultados fueron comparados y correspondieron con los datos provenientes de núcleos de crecimiento interno obtenidos en muestras alteradas de suelo.

Capítulo IV. Para dar sustento al uso de mosaicos de alta resolución en donde se pueden incluir las escalas: macroscópica, microscópica y hasta nanoscópica se

comparó con el análisis en imágenes aisladas para delimitar poros y raíces en el suelo. Las conclusiones fueron que la cuantificación en imágenes aisladas es poco confiable con gran variabilidad en sus resultados y que los mosaicos de alta resolución son una técnica, que además de cuantificar el total de una sección delgada permiten, delimitar otros componentes del suelo y correlacionarlo en diferentes escalas o magnificaciones de observación.

Capítulo V. Un problema común del análisis de microfotografías es la gran cantidad de recursos de procesamiento necesarios para evaluar imágenes multi-banda que son pesadas comúnmente. En este último capítulo se evaluó la precisión de la clasificación computarizada de raíces en imágenes con tres técnicas diferentes: imágenes simples, combinadas (diferentes tipos de iluminación) y transformadas mediante componentes principales. Si bien, todas las técnicas obtuvieron altos índices de concordancia (matrices de confusión e índice kappa) en la delimitación y clasificación de raíces, la transformación de componentes principales elimina el ruido y los datos redundantes en las imágenes resultante. Además, se reduce u optimiza el tamaño para su procesamiento y mejora la calidad de las imágenes, permitiendo un mayor contraste entre los componentes del suelo y la clasificación se facilita.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

Manejo agronómico de los Vertisols en México: una revisión

Agricultural management of Vertisols in Mexico: a review

Carlos Alberto Torres Guerrero¹, Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena^{1±}, Carlos Alberto Ortiz Solorio¹ y Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena²

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[±]Autora responsable (castor@colpos.mx)

² Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero s/n, Hacienda El Canadá. 66050 Gral. Escobedo, N. L., México.

RESUMEN

Los Vertisols ocupan 8.3% del territorio nacional y se consideran los suelos más productivos del país. A pesar de ello, las investigaciones sobre su manejo agronómico han sido llevadas a cabo sólo en algunas localidades del país o en campos experimentales que impide la transferencia de tecnología. Varios esfuerzos se han realizado por generar información en este tipo de suelos desde 1985, sobre todo en el Altiplano Mexicano y en la zona costera del Golfo de México donde son dominantes y presentan serios problemas de degradación; sin embargo, también son comunes en otras regiones de México en las cuales se cuenta con escasa información. El objetivo de esta investigación fue realizar una revisión bibliográfica acerca del manejo agronómico de Vertisols en México y las modificaciones que sufren sus propiedades físicas y químicas. El análisis de la información indica que los Vertisols presentan problemas de manejo en cuatro aspectos principales: a) mecanización; b) compactación, c) drenaje, y d) fertilización. No obstante, su complejidad, las caracterizaciones de sus propiedades edáficas se han realizado sólo con algunas determinaciones físicas o químicas. El entendimiento de los procesos de formación puede ayudar a generar prácticas agronómicas adecuadas para cada zona agroclimática y disminuir los problemas de degradación física (compactación) y química (declinación de la fertilidad) que se están presentando en nuestro país.

Palabras clave: *propiedades edáficas, fertilización, labranza, degradación química y física.*

SUMMARY

Vertisols cover 8.3% of our territory and are considered the most productive soils; nevertheless, agronomic research management has been carried out in experimental field or only in some parts of the country. In consequence, the transfer of technology, not only internationally, but also nationally, is limited. Several efforts have been made to generate information on these soils since 1985, especially in the Mexican highlands and the coastal Gulf of Mexico where they occur dominantly; however, they are also common in other parts of Mexico where the information is deficient. The aim of this research was to conduct a literature review about agronomic management of Vertisols and changes in their physical and chemical properties. The analysis indicates that Vertisols present management problems in four main areas: a) mechanization, b) compaction, c) drainage, d) fertilization. Despite its complexity, the characterizations of their soil properties have only been performed with some physical or chemical determinations. Knowing soil formation processes can help generate agronomic practices suitable for Vertisols in each agro-climatic zone and reduce the problems of physical degradation (compaction) and chemical (fertility decline) that occur in our country.

Index words: soil properties, fertilization, tillage, physical and chemical degradation.

Publicado en Terra Latinoamericana

Torres-Guerrero, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ortiz-Solorio, C.A. y Gutiérrez-Castorena, E.V. 2016. Manejo agronómico de los Vertisols en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*. 34: 457-466.

INTRODUCCIÓN

Los Vertisols (del latín *verteré*; invertir) son suelos de más de 25 cm de profundidad, contienen más de 30% de arcillas, y se mezclan constantemente por procesos de expansión y contracción dando como resultado grietas profundas en la estación seca, caras de deslizamiento (*slickensides*) y agregados en forma de cuña (Soil Survey Staff, 2014). El microrelieve *gilgai* es peculiar en estos suelos, aunque no se encuentra comúnmente. Los Vertisols se originan a partir de rocas ígneas o sedimentarias por meteorización o sedimentación donde se acumulan arcillas 2:1. Estos se

localizan principalmente en depresiones y áreas planas a onduladas, en climas tropicales, subtropicales, semiáridos a subhúmedos y húmedos, con una alternancia clara entre la estación seca y húmeda. La vegetación predominante es de sabana, bosque o pastizal (Coulombe *et al.*, 2000).

Las condiciones ambientales que conducen a la formación de un horizonte vértico o propiedades vérticas son aquellas donde ocurre precipitación suficiente para permitir el intemperismo de los materiales parentales, pero no tan alta como para producir lixiviación de bases; además de periodos secos, drenaje restringido y altas temperaturas (ISRIC, 2013).

A nivel mundial se considera que los Vertisols cubren 335 millones de has y se presentan principalmente en los trópicos semiáridos, con una precipitación media anual de 500-1000 mm, pero también se encuentran en los trópicos húmedos. En México, ocupan 9.5 millones de has, que representan 8.3% del territorio nacional (INEGI, 2014), y ocurren en diferentes zonas agroecológicas; de esa superficie 18% son de agricultura de temporal y 29.87% de riego (Ortiz y Gutiérrez, 1995, 1999). Estos suelos forman unidades puras con pocas asociaciones con otras clases de suelo, los cuales se concentran principalmente en el Altiplano Mexicano (Guanajuato y Querétaro) y en las planicies costeras del Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco) (Sotelo *et al.*, 2006, 2008, 2013). Aunque también se encuentran en el Eje Neovolcánico Transmexicano en los estados de Michoacán, Morelos, Estado de México y Querétaro (Krasilnikov *et al.*, 2013) y en los distritos de riego de Sonora y Sinaloa (INEGI, 2014).

Los Vertisols poseen un gran potencial productivo en granos (sorgo, trigo y maíz), caña de azúcar y hortalizas (SIAP, 2015); sin embargo, presentan degradación física (66%) por compactación de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-CP, 2002) o degradación química por declinación en su fertilidad (53%) (Moncada *et al.*, 2013). La contaminación con metales pesados (Siebe, 1994; Siebe y Cifuentes 1995), residuos farmacéuticos y bacterias patógenas (Dalkmann *et al.*, 2012) son otros problemas que se han presentado al irrigar estos suelos con aguas residuales.

Dada la relevancia de los Vertisols en la producción de cultivos, en sus implicaciones en la población rural o urbana debido a su degradación y los posibles cambios que pueden sufrir por eventos climáticos, se consideró necesario realizar una revisión bibliográfica tanto de literatura gris (memorias de congresos o tesis) y de revistas científicas sobre su manejo agronómico, con particular énfasis en la modificación de sus propiedades físicas, químicas y su fertilidad.

ESBOZO HISTÓRICO DEL ESTUDIO DE VERTISOLS EN MÉXICO

Sin duda en México se han realizado esfuerzos para comprender a los suelos arcillosos. Dos han sido quizá los mayores intentos para reconocer, entender, clasificar y manejar esta clase de suelos. El primero se concretó en la Reunión Nacional sobre el Manejo de Suelos Arcillosos y su implicación en la agricultura realizada en Celaya, Guanajuato en 1985 (Ruíz *et al.*, 1985). La Segunda Reunión Nacional se llevó a cabo diez años después en Mérida, Yucatán (Ruíz, 1995). En esta reunión se propuso la creación del Programa Nacional para el estudio de los suelos arcillosos de México. El objetivo era desarrollar una agricultura sustentable en cuanto al requerimiento nutricional de los cultivos, necesidades de fertilizantes y manejo agronómico, pero este programa nunca logró concretarse.

A pesar de la importancia agronómica de los Vertisols en nuestro país, al ser de los suelos con mayor potencial productivo, no existe una revisión bibliográfica que permita un análisis de los avances que se han alcanzado en los últimos 26 años, específicamente sobre su manejo agronómico. La degradación física y química que presentan la mayoría de ellos en más de 66 % (Moncada *et al.*, 2013), son una justificación para replantear la necesidad urgente de realizar un eficiente manejo agronómico que conduzca a su rehabilitación o conservación.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MANEJO

Las investigaciones más importantes realizadas sobre el efecto del manejo agronómico acerca de la modificación de las propiedades físicas y químicas en Vertisols de México se reportan en el Cuadro 1. La mayoría de ellas analizan algunas propiedades como: densidad aparente, retención de humedad, textura y permeabilidad y pocas evalúan a los agregados (formación, estabilidad y distribución) y porosidad del suelo.

De acuerdo con estas investigaciones, la primera modificación, con el cambio de uso del suelo de un ecosistema natural, es la compactación e incremento en la densidad aparente. El paso de maquinaria pesada (Sánchez-Vera *et al.*, 2003) o el pisoteo del ganado, cuando los Vertisols se usan como agostaderos (Geissen *et al.*, 2009), son los responsables de incrementar la densidad aparente (hasta 10 %) degradando al suelo por compactación (SEMARNAT-CP, 2002), sobre todo en la zona costera del Golfo (Krasilnikov *et al.*, 2013). En ese sentido es importante generar

prácticas agronómicas que disminuyan la densidad aparente (Dap) en términos de resistencia mecánica, retención de agua o porosidad, para ello es necesario llevar a cabo investigaciones más integrales de los Vertisols.

Algunos investigadores proponen realizar subsoleos (Ribón *et al.*, 2003), o bien utilizar tractores multiarados, en suelos con pendientes menores de 1% y poca pedregosidad (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2004). Otros indican que el tránsito reiterado del sistema de rodaje de los diferentes tractores (pesado, medio y ligero), alteran la resistencia a la penetración y aumenta la Dap (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2012).

La incorporación de residuos de cosechas anteriores es otra forma de mejorar las condiciones físicas del suelo *en un sistema de trigo-maíz-algodón* (Lee-Rodríguez y Núñez, 1985) o *en caña de azúcar* (Sánchez-Hernández *et al.*, 2003). Castellanos (1985) demostró que al agregar estiércol en diferentes concentraciones (hasta 120 kg ha⁻¹) en cultivos de alfalfa, disminuye la Dap, aumenta la retención de agua aprovechable, y mejora la estructura del suelo. Por su parte, Sánchez-Hernández *et al.* (2003, 2006) recomiendan aportar vermicompost de cachaza y estiércol bovino (1:1) para disminuir la Dap en 13% (de 1.34 a 1.16 Mg m⁻³). La distribución de agregados y el diámetro medio ponderado (indicador de estabilidad de estructura del suelo) incrementaron con el aumento en la cantidad de material orgánico agregado. De hecho, la adición de material orgánico a los Vertisols crucial para la formación de macro-agregados resistentes al agua (>2 mm); mientras que los microagregados son más susceptibles a sufrir degradación física por los procesos de humedecimiento y secado (Bravo-Garza *et al.*, 2005; 2009; 2010).

Otro factor que determina la fertilidad física en Vertisols es el tipo de labranza, para ello se han realizado diversas investigaciones con el fin de analizar los cambios en las propiedades del suelo. Mora *et al.* (2001) compararon tres manejos agronómicos en rotaciones de maíz-trigo: labranza convencional con quema de residuos, labranza convencional con incorporación de residuos y labranza cero con residuos sobre la superficie del suelo. Los resultados indican que la Dap en la labranza cero fue mayor en comparación con la labranza convencional; mientras que el contenido de humedad en la capa superficial se incrementó de 2 a 5% en la labranza cero. Además, en labranza cero la incorporación de residuos orgánicos incrementó la porosidad, permeabilidad y se redujo la compactación (Covarrubias, 1985). En contraste con la labranza convencional, la cual modifica la capacidad de retención de agua (Oleschko *et al.*, 1993) y puede formar un piso de arado (impidiendo la penetración de las raíces) cuando se emplea la siembra directa (Fuentes *et al.*, 2009).

La agricultura de conservación es una práctica agronómica que propone reducción del laboreo de las tierras (cero labranza), rotación de cultivos y adición de residuos de cosechas anteriores (Oleschko *et al.*, 1996; Fuentes *et al.*, 2009). No obstante, no siempre se obtienen resultados que mejoren la calidad física de los Vertisols sobre todo en zonas áridas (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2015).

El drenaje y las propiedades hídricas de los Vertisols, también son factores importantes que dificultan su manejo agronómico. Los procesos de humedecimiento y secado pueden colapsar a la estructura del suelo y afectar seriamente a los cultivos rompiendo sus raíces (Ortega-Larrocea *et al.*, 2001). La aparición de grietas se debe a la pérdida de humedad por debajo de los 10 g g⁻¹, fenómeno que se observa en zonas de cultivo y no así en zonas con cobertura vegetal (Navar *et al.*, 2002). Esto provoca que en la temporada de lluvias las grietas se llenen de sedimento para posteriormente colapsarse y formar escorrentías en las que se puede presentar pérdida o erosión del suelo. Geissen *et al.* (2008), proponen resolver este fenómeno con la instalación de barreras vivas para evitar la formación de cárcavas. Sin embargo, es necesario conocer el origen de formación y los materiales parentales de los Vertisols para ofrecer un manejo adecuado debido a la variabilidad de materiales (ígneo y sedimentario) y condiciones climáticas necesarias para la formación de estos suelos (Geissen *et al.*, 2007; Krasilnikov *et al.*, 2013).

Cuadro 1. Principales investigaciones realizadas en Vertisols, en México

Autor	Año	Lugar	Cultivo	Fertilización	Manejo agronómico	Propiedades edáficas modificadas/rendimientos
Castellanos	1985	Matamoros, Coahuila	Alfalfa	60 Kg N ha ⁻¹ solo al testigo	Incorporación de estiércol de bovino	Retención de humedad, infiltración, Dap, MO
Covarrubias	1985	La Marina, Tamaulipas	Maíz	No especificado	Labranza tradicional y de conservación	Porosidad, permeabilidad y salinidad.
Lee-Rodríguez y Núñez	1985	Cd. Obergón, Sonora	Rotación trigo-maíz-algodón.	0-120 kg ha ⁻¹ barbecho 0-40 kg ha ⁻¹	Adición, quema y extracción de residuos de cosecha.	Estabilidad de agregados, humedad aprovechable, infiltración, Dap y resistencia a la penetración
Laird et al.	1985	Guanajuato	Maíz y sorgo temporal	0-80 kg ha ⁻¹ de Nitrógeno	Diferentes dosis de fertilización nitrogenada	Aumento de rendimiento de cultivos
Rosales y Figueroa	1985	Mexicali, Baja California Norte	Pasto ryegrass	Estiércol bovino	Diferentes prácticas de labranza y aplicación de estiércol bovino.	MO, N y P en el suelo.
Oleschko et al.	1996	Guanajuato	Alfalfa, maíz, sorgo, trigo, brócoli, cebolla, zanahoria y chayote	No especificado	Diferentes manejos agronómicos combinando cultivos con labranza tradicional y de conservación	Dap, N total y MO.
Salgado et al.	2000	Tabasco	Caña de azúcar	0-0-0 y hasta 200-80-80 NPK	Diferentes dosis de fertilización NPK	Aumento de rendimiento de cultivo
Mora et al.	2001	Guanajuato	Trigo	No especificado	Diferentes sistemas de labranza (Convencional y de conservación) y quema de residuos	Dap, resistencia a la penetración
Salinas-García et al.	2001	Michoacán	Maíz	La recomendada para cada región de Michoacán	Labranza cero, convencional y mínima	COS, biomasa microbiana, N y P.
Espinosa et al.	2002	Chontalpa, Tabasco	Sorgo	120-80-60 NPK	Evaluación de la eficiencia en utilización de fertilizantes nitrogenados aplicados en diferentes etapas de cultivo.	Eficiencia en el uso de N en el cultivo.
Salinas-García et al.	2002	Michoacán	Maíz	La recomendada para cada región de Michoacán	Labranza cero y convencional con incorporación de residuos	Dap, N, biomasa microbiana, COS, P extractable.
Ribón et al.	2003	Santa Rosalía, Tabasco	Caña de azúcar	120-60-60	Cultivo de caña de azúcar durante 5-30 años	MO y N total del suelo.
Salgado et al.	2003	Tabasco	Caña de azúcar	0-0-0 y hasta 160-35-67 NPK	Diferentes dosis de fertilización NPK y dinámica de invertasas	Aumento del rendimiento y contenido de N en el suelo.
Sánchez Hernández et al.	2003	Chontalpa, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Adición de rastrojos de cosecha de caña de azúcar	Contenido de humedad residual, pH, N total y P-Olsen
Sánchez-Vera et al.	2003	Coatzacoalcos, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Efecto de manejo (maquinaria) en tres agrosistemas diferentes	Dap
Bravo-Garza et al.	2005	Nuevo León	Maíz	No especificado	No especificado	N, COS, estabilidad de agregados
Follett et al.	2005	Celaya, Guanajuato	Trigo, maíz, frijol y sorgo	250 Kg Ha ⁻¹ N	Labranza cero, convencional, rotación de cultivos y adición de residuos orgánicos.	Dinámica y secuestro de C

Continuación Cuadro 1. Principales investigaciones realizadas en Vertisols, en México

Autor	Año	Lugar	Cultivo	Fertilización	Manejo agronómico	Propiedades edáficas modificadas/rendimientos
García Silva <i>et al.</i>	2005	Valle de Santiago, Gto.	Maíz y cebada	No especificado	Siembra directa con residuos. Siembra convencional quema de residuos.	COS, MO y huminas.
García Silva <i>et al.</i>	2006	Valle de Santiago, Gto.	Maíz-sorgo Cebada-trigo	180-60-0 NPK	Siembra directa sin residuos. Siembra directa y convencional con manejo de residuos de cosecha	Dap, COS y MO.
Ramírez-Barrientos <i>et al.</i>	2006	Valle de Santiago, Guanajuato	Trigo	No especificado	Labranza cero	Dap, MO, pH, N total, P y CIC.
Sánchez-Hernández <i>et al.</i>	2006	Chontalpa, Tabasco	No especificado	No especificado	Aplicación de vermicomposta de cachaza	Dap, agregados, C total y MO.
Vidal-Martínez <i>et al.</i>	2006	Montecillo, Edo. de México	Brócoli	0-140 partes de K	Manejo convencional y fertirrigación en invernadero	Aumento en rendimientos y contenido de K.
Bolio-López <i>et al.</i>	2008	Santa Rosalía, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Dinámica de potasio en cultivos de caña de diferentes edades	Contenido de K y aumento del rendimiento.
Fregoso Tirado.	2008	Valle de Santiago, Guanajuato	Maíz, trigo y cebada	250-100-0 280-150-90 NPK	Labranza de conservación	Mejor fertilidad química con labranza conservación. acidificación en todos los tratamientos
Rivera Hernández <i>et al.</i>	2009	Campeche	Maíz	80-100 kg ha ⁻¹ P	Diferentes concentraciones de fertilización con fosforo	pH, humedad del suelo y cantidad de P
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2009	Linares, Nuevo León	Maíz	No especificado	Labranza tradicional	Contenido de humedad y distribución de agregados.
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2010	Noreste de México	Maíz	No especificado	No especificado	Agregados estables en agua y MOP
Rivera Hernández <i>et al.</i>	2010	Campeche	Maíz	80-100 kg ha ⁻¹ P	Diferentes concentraciones de fertilización con fosforo y contenidos de humedad.	Humedad del suelo y fertilización con Fosfato
Gutiérrez-Rodríguez <i>et al.</i>	2012	Valle Toluca, Edo. Méx.	Trigo	No especificado	Efecto de rodaje de tres tipos de tractores agrícolas	Aumento de la resistencia a la penetración.

Dap= densidad aparente; MO= materia orgánica; CIC= capacidad de intercambio catiónico; MOP = materia orgánica particulada; COS= carbono orgánico del suelo; N = Nitrógeno; P = Fósforo.

PROPIEDADES QUÍMICAS Y MANEJO

La fertilidad química de los Vertisols ha sido estudiada en cambios de uso del suelo y en diversos manejos agronómicos; aunque la mayor parte de estas investigaciones han sido realizadas comparando diferentes sistemas de labranza y sólo contemplando algunas propiedades como MO y pH.

Con el cambio de uso de suelo, por ejemplo, de una selva a un cultivo de caña de azúcar o para realizar prácticas de agostadero se ha reportado una disminución drástica en el contenido de MO y pérdida de la estructura (Rosales y Figueroa, 1985). Medinilla *et al.* (2014) encontraron una reducción en el contenido de MO de 3% y degradación de agregados de origen biológico en tan solo un año. Estos cambios son atribuidos a la naturaleza, volumen y grado de humificación de la materia orgánica (Oleschko *et al.*, 1996).

García-Silva *et al.* (2006) indican que los decrementos en el contenido de COS se deben al escaso desarrollo de la estructura de los Vertisols, en donde el C al ser liberado de los agregados queda fácilmente disponible para los microorganismos del suelo. Estudios posteriores en este mismo sitio, indican que el contenido de ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF), así como su relación (AH/AF) disminuye en Vertisols con labranza convencional en comparación con los sometidos a manejo agronómico donde se gestionan los residuos de cosechas o se emplea la siembra directa. El proceso responsable es la lixiviación y afecta no sólo al C sino también a elementos móviles como el nitrógeno (García-Silva *et al.*, 2005; 2006). En el caso del pH, P, K y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se ha mencionado que no sufren modificaciones a través de los años con los sistemas de labranza (Ribón *et al.*, 2003).

Las prácticas agronómicas recomendadas para restablecer la fertilidad química en la mayoría de los suelos agrícolas con problemas de compactación como los Vertisols son el subsoleo e incorporación de diferentes fuentes de MO (Coulombe *et al.*, 2000). El subsoleo es utilizado para evitar la acumulación de MO sólo en la superficie y optimizar la fertilización con N en el caso de un pastizal y el cultivo de caña (Sánchez-Vera *et al.*, 2003). Otros autores recomiendan la mínima alteración del suelo (agricultura de conservación), para que la biomasa microbiana y nutrimentos como el N inorgánico y P extractable se puedan concentrar en la superficie del suelo (0-10 cm), y de esa manera promover mejores condiciones para la captura de carbono (Salinas-García *et al.*, 2001; 2002).

Varias investigaciones han demostrado que, con la reducción de la labranza, la actividad biológica mejora la estructura del suelo y se presenta mayor tasa de recambio de nutrientes, lo que hace al sistema más dinámico, sobre todo después de 10 años con este manejo (Fregoso Tirado *et al.*, 2008). Asimismo, los procesos de salinización son detenidos o aminorados y la saturación del suelo se reduce (Covarrubias, 1985). Ramírez-Barrientos *et al.* (2006) indican que aquellas características que presentan detrimento en labranza cero, como la porosidad y la retención de humedad, no afectan demasiado el desarrollo de los cultivos y los rendimientos son cercanos a los obtenidos con labranza convencional. De la misma manera, se indica que, con la adición de estiércol bovino, practicando labranza mínima o cero (Castellanos, 1985) o con la incorporación de residuos vegetales, se incrementan los contenidos de N, MO, P, Ca, Mg y CIC (Rosales y Figueroa, 1985; Lee-Rodríguez y Núñez 1985; Oleschko *et al.*, 1996, Sánchez-Hernández *et al.*, 2003, 2006; Ramírez-Barrientos *et al.*, 2006).

En algunas ocasiones, no hay cambios en las variables químicas por la incorporación de MO, debido a la nula descomposición del rastrojo de cosecha que no permite cambios en las variables Nt, P-Olsen y pH (Sánchez-Hernández *et al.*, 2003). En este sentido, es importante la incorporación de los residuos de cosecha, irrigación o modificación en el régimen de humedad del suelo e investigación en la actividad biológica para determinar la tasa de captura de C (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2015).

FERTILIZACIÓN Y MANEJO

Gran parte de la investigación acerca de la fertilización en Vertisols se ha realizado en cultivos de caña de azúcar, gracias a los esfuerzos de un grupo de investigación multidisciplinario en el Campus Tabasco, del Colegio de Postgraduados. Salgado-García *et al.* (2000) propusieron una dosis óptima de fertilización para la caña de azúcar de 160-80-80 kg·ha⁻¹ (N-P-K) que se aplica en bandas y después recomiendan enterrar el fertilizante para incrementar los rendimientos. Si se realiza esta última práctica, la eficiencia de recuperación del N es de 20%, superior a la obtenida mediante la aplicación superficial; además, es necesario que la fertilización se realice a los tres meses después de la siembra (Salgado-García *et al.*, 2001). Esta tendencia también fue observada en sorgo en donde se recomienda fraccionar las dosis de fertilizante para aumentar la eficiencia del N (Espinosa *et al.*, 2002). En otros trabajos, Salgado-García *et al.* (2003) demostraron que al agregar 160-35-67 kg·ha⁻¹ (N-P-K), aplicado como una mezcla de sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄,

superfosfato triple ($10\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-H}_2\text{O-2HF}$) y KCl, enterrado tres meses después del rebrote, se producen los mayores incrementos en el rendimiento de la caña de azúcar en comparación con el testigo en los Vertisols.

Palma-López *et al.* (2002) propusieron un sistema integrado de fertilización (N, P, y K) para el ingenio azucarero Azucarmex, Tabasco. Utilizaron un modelo conceptual fundamentado en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo, el suministro que hace de éste el suelo y la eficiencia del fertilizante. Las dosis de fertilización obtenidas debieron ser ajustadas para generar una recomendación viable para la caña de azúcar en cada clase de suelo (Fluvisol, Vertisol, Cambisol, Luvisol y Leptosol), donde los Vertisols son la unidad de suelo que ocupa mayor área (36.9% del total del ingenio). En este caso particular la dosis recomendada se estimó en 34, 0, 105 kg Ha⁻¹ NPK, debido a que los Vertisols tienen la capacidad para restablecer sus propiedades químicas, sin embargo, las propiedades físicas pueden ser modificadas impidiendo el enraizamiento de la caña de azúcar, pero este fenómeno puede ser revertido con el subsoleo. Los autores indican que las dosis recomendadas por este modelo pueden lograr sus máximos rendimientos si el resto de las labores de cultivo (resiembra, drenaje y variedades empleadas) se realizan en tiempo.

La fertilización con N y la implementación de sistemas de cero labranza con rotación de cultivos tienen el potencial de incrementar el secuestro de SOC y mantener altos rendimientos de cultivos como sorgo, trigo, maíz y caña de azúcar en los Vertisols irrigados del centro de México. También las cantidades de C incrementan sus concentraciones dependiendo de la cantidad de N agregado; este efecto se ve magnificado cuando se emplea la labranza de conservación y rotación de cultivos (Follett *et al.*, 2005). La fertilización con P en Vertisols está relacionada con la humedad del suelo, al aumentar la tensión entre la matriz del suelo y las moléculas de agua. Ocurre después un déficit de P, y las plantas sufren estrés afectando algunos parámetros como altura, diámetro y peso de hojas (Rivera-Hernández *et al.*, 2009; 2010).

Existen, aunque en menor cantidad, algunos esfuerzos por investigar la dinámica de otros nutrientes en la fertilización de Vertisols. El K⁺ ha sido quizá uno de los nutrientes más estudiados en estos suelos, debido a su alta capacidad amortiguadora que limita su disponibilidad (Bolio-López *et al.*, 2008). Este elemento abunda de manera natural en algunos suelos principalmente cuando se forman a partir de rocas ígneas; sin embargo, es necesario agregar fertilizantes potásicos para aumentar los rendimientos de cosecha tanto en manejo convencional (Zúñiga-Estrada *et al.*,

2010) como en fertirriego (Vidal-Martínez *et al.*, 2006), sobre todo en suelos derivados en otro tipo de materiales parentales (rocas sedimentarias o metamórficas). Lozano García *et al.* (2011) recomiendan utilizar labranza mínima como una forma de liberar más K^+ a la solución del suelo en la capa arable.

CONSIDERACIONES FINALES ACERCA DEL MANEJO DE VERTISOLS

De acuerdo con la revisión de literatura se puede indicar que hay cuatro líneas o estrategias que se deben seguir en el manejo agronómico de los Vertisols en México, las cuales son:

- a) **Mecanización:** Los suelos deben ser preparados para la siembra en momentos específicos (según el contenido de humedad), para que el paso de la maquinaria o de la tracción animal no se vea impedido y pueda prepararse el terreno de manera adecuada (Sánchez-Vera *et al.*, 2003). Algunas alternativas que se proponen son: uso de cultivos de cobertura para evitar la pérdida de humedad; mantener el contenido de humedad con riegos o calendarizar los riegos para el paso de la maquinaria; dejar una cubierta de rastrojo (aunque puede conllevar a fenómenos de compactación con el tiempo) y adicionar estiércol. También es necesario aumentar la investigación tanto de implementos y rodamientos necesarios para la mecanización de los Vertisols.
- b) **Compactación.** Este fenómeno está relacionado tanto con el paso de la maquinaria como con las técnicas agrícolas. En el primer caso, hay un creciente interés para utilizar diferentes sistemas arado-tractor que repercutan de manera reducida su paso a través del terreno, lo que implicará un ahorro sustancial en la preparación del terreno para la siembra. Además, se está recomendando la agricultura de conservación o la labranza convencional con incorporación de residuos; aunque es necesario puntualizar que se deben de considerar las condiciones ambientales y socioeconómicas para el éxito de estas prácticas.
- c) **Drenaje.** Esta práctica debe ser prioritaria, ya que de esto depende en gran medida los cambios en las características físicas y químicas por lo que es necesario aumentar la investigación hidráulica tanto en los sistemas de temporal como los de riego.
- d) **Fertilización.** La aplicación de macro y micronutrientes (orgánicos e inorgánicos) son importantes para obtener mayores rendimientos y hacer productivos los agro-ecosistemas. Sin embargo, hasta la fecha pocos han sido los intentos por generar información para los

Vertisols de México con un enfoque de sistemas y no con un modelo de “caja negra”. En ese sentido, es prioritario optimizar las prácticas de fertilización con sistemas integrados que involucren el levantamiento de suelos para indicar cómo son y en dónde ocurren.

Es conveniente también considerar los factores de formación de los Vertisols y sus procesos pedogenéticos, debido a la gran mega-diversidad de condiciones que ocurren en nuestro país. Aunque todos comparten el proceso de vertización, es necesario tomar en cuenta los procesos de alcalinización y salinización los cuales están relacionados con su degradación; mientras que los procesos de melanización o antropogenización indican que el manejo de los Vertisols es el correcto. La caracterización de materiales parentales ha sido realizada por Sotelo *et al* (2013) en los estados de Veracruz y Tamaulipas y estudios geológicos por Geissen *et al.* (2007) en Campeche.

Finalmente, es importante resaltar que la mayoría de las investigaciones fueron realizadas en centros de investigación principalmente en Villa Diego, Valle de Santiago, Guanajuato; Chontalpa, Tabasco; Campeche y Linares, Nuevo León y pocos han sido llevados a cabo directamente con productores que posean parcelas con esta clase de suelo. Además, una gran cantidad de estudios no clasificaron el suelo dónde se realizó el experimento, lo que es una limitante para la transferencia de tecnología a nivel nacional e internacional.

CONCLUSIONES

Aunque se han realizado algunas investigaciones para establecer el manejo de Vertisols en México, estas se han generado principalmente en campos experimentales y contemplando sólo algunas de sus propiedades. La mayoría de las recomendaciones para mejorar su fertilidad química son muy generales que se pueden aplicar a diversas clases de suelo, lo que significa una pobre comprensión de sus propiedades, además hay una escasa relación con la fertilidad física.

La degradación de los Vertisols por compactación y declinación de su fertilidad física se ha incrementado con los años en nuestro país. Una alternativa que se está promoviendo es la labranza de conservación, sin considerar que estos suelos se presentan en diversas regiones agroecológicas con diferentes factores y procesos pedogenéticos que requieren investigación puntual.

Los Vertisols son uno de los suelos más productivos de nuestro país, por lo que es indispensable que exista una o varias instituciones responsables de generar y aplicar conocimiento en diversas prácticas agronómicas y se considere a los diferentes actores sociales.

LITERATURA CITADA

- Bolio-López, G. I., S. Salgado-García, D. J. Palma-López, L. C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada M. y J. D. Etchevers. 2008. Dinámica del potasio en Vertisols y Fluvisoles cultivados con caña de azúcar Terra Latinoamericana 26: 253-263.
- Bravo-Garza, M. R. and R. B. Bryan. 2005. Soil properties along cultivation and fallow time sequences on Vertisols in Northeastern Mexico. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 473-481.
- Bravo-Garza, M. R., R. B., Bryan, and P. Voroney. 2009. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. Geoderma 151: 150-156.
- Bravo-Garza, M. R, P. Voroney, and R. B. Bryan. 2010. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ¹⁴C labeled maize residues, wetting, and drying cycles in Vertisols. Soil Biol. Biochem. 42: 953-959. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.012>.
- Castellanos, J. 1985. El uso de la materia orgánica como mejorador de las características físicas de un suelo arcilloso. *En: J. F. Ruíz Figueroa, B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio (eds.). Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura.* Celaya, Guanajuato, México.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. 269-286. *In: Malcolm E. Sumner, (ed.). Handbook of Soil Science.* CRC Press. New York, NY, USA.
- Covarrubias, J. M. 1985. Sistemas de labranza con maíz en suelos con permeabilidad deficiente. *En: J. F. Ruíz Figueroa, B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio (eds.). Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura.* Celaya, Guanajuato, México.
- Espinosa F., J., E. Carrillo A., D. J. Palma L., J. J. Peña C. y S. Salgado G. 2002. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en sorgo con la técnica isotópica ¹⁵N, en un Vertisol con drenaje subsuperficial. Terra 20: 129-139.
- Follett, R. F., J. Z. Castellanos, E. D. Buenger. 2005. Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. Soil Tillage Res. 83: 148-158. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.02.013>.
- Fregoso Tirado, L. F. 2008. Cambios en las características químicas y microbiológicas de un Vertisol inducidos por sistemas de labranza de conservación. *Terra Latinoamericana* 26: 161-170.
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. De León-González, C. Hidalgo, L. Dendooven, K. D. Sayre, and J. D. Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. Eur. J. Agron. 30: 228-237.
- García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón, J. F. Gallardo Lancho y P. Paneque Rondón. 2005. Efecto de la siembra directa en las reservas orgánicas de un Vertisol de Guanajuato, México. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 14: 38-44.
- García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón y J. F. Gallardo Lancho. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. *Terra Latinoamericana* 24: 241-251.
- Geissen, V., C. Kampichler, J. J. López-de Llergo-Juárez, and A. Galindo-Alcántara. 2007. Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: Development of a decision tree modeling approach. *Geoderma* 139: 277-287.
- Geissen, V., J. G. López de Llergo-Juárez, A. Galindo-Alcántara y R. Ramos-Reyes. 2008. Erosión superficial y carstificación en Macuspana, Tabasco, Sureste de México. *Agrociencia* 42: 605-614.
- Geissen, V., R. Sánchez-Hernández, C. Kampichler, R. Ramos-Reyes, A. Sepulveda-Lozada, S. OchoaGoana, B. H. J. de Jong, E. Huerta-Lwanga, and S. Hernández-Daumas. 2009. Effects of land use change on some properties of tropical soils- An example from Southeast Mexico. *Geoderma* 151: 87-97.
- Gutiérrez-Castorena, E. V., M. C. Gutiérrez-Castorena, and C. A. Ortiz-Solorio. 2015. Carbon capture and pedogenetic processes by change of moisture regime and conventional tillage in Aridisols. *Soil Tillage Res.* 150:114-123. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.02.001>.

- Gutiérrez-Rodríguez, F., A. González Huerta, R. Serrato Cuevas y T. H. Norman Mondragón. 2004. Evaluación tecnológico-explotativa del conjunto multirado-tractor J. D. Modelo 4235, en la labor de preparación primaria de un suelo Vertisol. *Cienc. Ergo Sum.* 11: 171-176.
- Gutiérrez-Rodríguez, F., A. González Huerta, D. J. Pérez-López, O. Franco-Mora, E. J. Morales-Rosales, P. Saldívar-Iglesias y C. G. Martínez-Rueda. 2012. Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un Vertisol. *Terra Latinoamericana* 30: 1-7.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional). Edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). 2013. The Vertisols. Disponible en www.isric.org/isric/webdocs/docs/major_soils_of_the_world/set3/vr/vertisol.pdf. (Consulta: noviembre 15, 2013).
- Krasilnikov, P., M. C. Gutiérrez-Castorena, R. J. Ahrens, C. O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov, and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. The soils of Mexico. Springer Science+Business Media Dordrecht. Netherlands.
- Laird, R. J., G. Rodríguez, H. y B. A. Ruíz. 1985. Respuesta del maíz de temporal a la fertilización en los Vertisols de El Bajío, México. *En: J. F. Ruíz Figueroa, B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio (eds.). Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura.* Celaya, Guanajuato, México.
- Lee-Rodríguez V. y R. Núñez Escobar. 1985. Efecto de la adición de residuos de cosecha sobre las propiedades físicas de un suelo arcilloso del Valle del Yaqui. *En: J. F. Ruíz Figueroa, B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio (eds.). Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura.* Celaya, Guanajuato, México.
- Lozano-García, L. Parras-Alcántara, J.L. Muriel-Fernández, 2011. Soil tillage effects on monovalent cations (Na⁺ and K⁺) in vertisols soil solution. *Catena.* 84: 61-69.
- Medinilla-Salinas, L., M. de la C. Vargas-Mendoza, S. López-Ortiz, C. Ávila-Reséndiz, W. Bruce-Campbell, and M. C. Gutiérrez-Catorena. 2014. Growth, productivity and quality of *Megathyrus maximus* under cover from *Gliricidia sepium*. *Agrofor. Syst.* 87: 891-899.
- Moncada de la Fuente, J., M. Anaya Garduño, C. Ortiz Solorio, P. Sánchez García y J. Chacón Rodríguez. 2013. Folleto técnico. Suelo: Protejamos el suelo que nos da vida. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Mora, M., V. Ordaz, J. Z. Castellanos, A. Aguilar Santelises, F. Gavi y V. Volke H. 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un Vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra* 19: 67-74.
- Navar, J., J. Mendez, R. B. Bryan, and N. J. Kuhn. 2002. The contribution of shrinkage cracks to bypass flow during simulated and natural rainfall experiments in northeastern Mexico. *Can. J. Soil Sci.* 82: 65-74.
- Oleschko, K., J. D. Etchevers B., and L. Osorio J. 1993. Pedological features as indicators of the tillage effectiveness in Vertisols. *Soil Tillage Res.* 26: 11-31.
- Oleschko, C., J. D. Etchevers, and A. Hernández. 1996. Structure and pedofeatures of Guanajuato (México) Vertisol under different cropping systems. *Soil Tillage Res.* 37: 15-36.
- Ortega-Larrocea, M. P., C. Siebe, G. Becárd, I. Méndez, and R. Webster. 2001. Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of Mexico. *Appl. Soil Ecol.* 16: 149-157.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez C. 1995. Clasificación de Vertisols en la Taxonomía de Suelos Versión 1992. pp. 231-236. *In: J. F. Ruiz Figueroa (ed.). Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable. 2a Reunión Nacional sobre Suelos Arcillosos del 10 al 14 de noviembre de 1994.* Mérida, Yucatán, México.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez Castorena. 1999. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., J. J. Obrador O., A. Trujillo N., L. del C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruíz B. y M. A. Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.
- Ramírez-Barrientos, C. E., B. Figueroa-Sandoval, V. Ordaz-Chaparro y V. H. Volke-Haller. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol *Terra Latinoamericana* 24: 109-118.
- Ribón C., M. A., S. Salgado García, D. J. Palma López y L. C. Lagunes Espinoza. 2003. Propiedades químicas y físicas de un Vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia* 28: 154-159.
- Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, L. A. Aceves Navarro, and E. García-López. 2009. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 96: 1285-1292.

- Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, and L. A. Aceves-Navarro. 2010. Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 97: 1365-1374. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.001>.
- Rosales, R. y J. M. Figueroa Vargas. 1985. Diferentes prácticas de labranza para rye grass en suelos arcillosos del Valle de Mexicali. Distrito de riego 014. SARH. Primera reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Del 2 al 5 de octubre de 1985. Celaya, Gto. Memorias. UACH, Suelos. Chapingo, México.
- Ruíz Figueroa, J. F. 1995. Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable. Trabajos presentados en la segunda reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos, Mérida, Yucatán. Chapingo, México. ISBN: 9688843032 9789688843031
- Ruíz Figueroa, J. F., B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio. 1985. Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya Guanajuato. Chapingo, México.
- Salgado G., S., E. R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J. J. Peña C., J. D. Etchevers B., D. J. Palma L. y M. R. Soto H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.
- Salgado G., S., R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2003. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia*. 28: 576-580.
- Salinas-García, J. R., J. de J. Velázquez-García, M. Gallardo-Valdez, P. Díaz-Mederos, F. Caballero-Hernández, L. M. Tapia-Vargas, and E. Rosales-Robles. 2002. Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-western Mexico. *Soil Tillage Res.* 66: 143-152. DOI. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00022-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00022-3).
- Salinas-García J.R., A.D Báez-González, M Tiscareño-López, E Rosales-Robles. 2001. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil and Tillage Research*.59: 67-79. DOI. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00187-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00187-2).
- Sánchez-Hernández R., D. J. Palma López, J. J. Obrador Olán y U. López Noverola. 2003. Efecto de los rastrojos sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Vertisol y rendimientos de caña de azúcar (*saccharum officinarum* L.) en Tabasco, México. *Interciencia (Venezuela)*. 28: 404-407.
- Sánchez Hernández, R., D. J. Palma López, M. D. Hidalgo Moreno, V. Ordaz-Chaparro y G. S. Benedicto Valdés. 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de Vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Univer. Cienc.* 22: 13-26.
- Sánchez-Vera G., J. J., Obrador Olán, D. J. Palma López y S. Salgado García. 2003. Densidad aparente en un Vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia* 28: 347-351.
- SEMARNAT-CP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados). 2002. Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, a escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Cierre de la producción agrícola por estado. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>. (Consulta: enero 15, 2016).
- Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 10: 15-21.
- Siebe, C. and E. Cifuentes, 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview. *Int. J. Environ. Health Res.* 5: 161-173.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. US Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Sotelo R., E., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio, G. Cruz-Bello y M. A. Segura-Castruita. 2006. Identificación de Vertisols de origen sedimentario a través de su firma espectral. *Agric. Téc. Méx.* 32: 303-312.
- Sotelo-Ruíz, E. D., M. del C. Gutiérrez-Castorena, G. M. Cruz-Bello, and C. A. Ortiz Solorio 2013. Physical, chemical, and mineralogical characterization of Vertisols to determine their parent material. *Rev. Interciencia* 7: 488-495.
- Sotelo-Ruíz, E., Ma. del C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz Solorio, G. Cruz Botello y M. A. Segura-Castruita. 2008. Historia y desarrollo de la clasificación de Vertisols en el sistema FAO y taxonomía de suelos. *Terra Latinoamericana* 26: 325-332.
- Vidal-Martínez., J. L, R. Núñez E., I. Lazcano F., J. D. Echevers B. y R. Carrillo G. 2006. Nutrición potásica del brócoli (*Brassica oleracea*) con manejo convencional y fertirrigación en un Vertisol en invernadero. *Agrociencia* 40: 1-11.

Zúñiga-Estrada, L., J. J. Martínez-Hernández, G. A. Baca-Castillo, A. Martínez-Garza, J. L. Tirado-Torres, J. Kohashi-Shibata y J. Cruz-Díaz. 2010. Efecto de la fertilización con potasio en un Vertisol sobre la relación cantidad/intensidad (Q/I). *Terra Latinoamericana*. 28: 319-32.

CLASIFICACIÓN CAMPESINA DE TIERRAS

México cuenta con una población total de 112, 336, 538 habitantes de los cuales 22.2% viven en zonas rurales y son en su mayoría responsables de la producción del campo mexicano (INEGI 2010). En el país se ha optado por un modelo globalizador occidental para la gestión, convivencia y resguardo de los recursos naturales, donde la explotación desmedida y la máxima ganancia con la mínima inversión (en conservación de recursos naturales) son el común denominador de las políticas públicas actuales. El pensamiento occidental se sustenta en los principios de racionalidad, utilitarismo y especialización (Toledo, 2000); sin embargo, en la actualidad promueve valores como la competencia, explotación de la naturaleza, acumulación, visión a futuro, juventud y belleza, jerarquía e impaciencia generando comúnmente el deterioro del ambiente y fracasos en el manejo de los recursos naturales.

En este contexto el conocimiento tradicional ha quedado relegado a algunas pequeñas demostraciones “culturales”, con fines más bien turísticos y económicos. A pesar de que México cuenta con 6.6 millones de personas que pertenecen a una etnia indígena, parece que estos grupos y su conocimiento acerca del manejo de los recursos naturales corren el riesgo de desaparecer. No obstante, en la actualidad algunos esfuerzos han generado interés en este tipo de conocimiento, como lo son los estudios etnoecológicos, que buscan entender las relaciones que se establecen entre la naturaleza y la sociedad, mediante el estudio integrado del *corpus* y de la *praxis*, del productor rural (Toledo *et al.*, 2000; Ortiz y Gutiérrez, 2001), donde para el conocimiento tradicional la tierra y naturaleza son sagradas. Esta última nutre, enseña y soporta, es por ello que en la cosmovisión indígena todo se encuentra ligado (principio de reciprocidad) por lo que se llevan a cabo intercambios simbólicos en la mayoría de los casos (Toledo, 2000).

El suelo es tal vez uno de los recursos más estudiados desde esta perspectiva y se le denomina Etnoedafología. Esta disciplina se encarga de estudiar los conocimientos que los productores poseen sobre el recurso suelo y sus relaciones (Williams y Ortiz, 1981), y se encuentra entre las ciencias sociales y naturales. Esta ciencia ha demostrado que la interrelación entre escalas espacio-temporales (climática, ecográfica, agroecológica y biofísica) y operacionales (estructural,

dinámica, relacional, utilitaria y simbólica) permite interpretar de manera adecuada el conocimiento, teorías y prácticas locales-tradicionales. Para este tipo de estudios se emplean tres enfoques 1) etnográfico, que es aquel que toma sólo en cuenta al conocimiento etnoedafológico; 2) comparativo, donde se contrasta el conocimiento local con el científico 3) integral en el cual se relaciona y analiza el manejo de procesos relacionado con la dinámica de los recursos (Barrera-Bassols y Zink, 2000).

Los principales aportes de la etnoedafología son acerca de las creencias, mitos, rituales y simbolismos relacionados con el manejo y calidad; la clasificación local de tierras; explicación local de la distribución de propiedades y procesos del suelo; la relación del conocimiento local con procesos biofísicos; la adopción local de prácticas de manejo con base a la calidad y la co-validación del conocimiento etnoedafológico (Barrera-Bassols y Zink, 2000; Ortiz y Gutiérrez, 2001). Los avances y tendencias que se han mencionado son: la formalización de la clasificación campesina de tierras con esquemas sistematizados, la descripción detallada de manejos tradicionales, la valoración socioeconómica de los agroecosistemas y la comparación del conocimiento tradicional con el conocimiento técnico. En este último rubro, se han encontrado una alta correlación entre los dos tipos de conocimiento (técnico y tradicional). Más aun cuando se trata de manejos agronómicos, estos estudios proveen de un marco preliminar para la estratificación y manejo técnico. El conocimiento tradicional puede ser considerado como una taxonomía formal que en la mayoría de los casos es más específica que la técnica (Williams y Ortiz, 1981; Ortiz y Gutiérrez, 1999; Abasolo, 2001).

La clasificación campesina de tierras y su relación con el manejo agronómico del suelo

Existen reportes desde el siglo XVI de viajeros, misioneros y exploradores acerca de la percepción de la naturaleza acerca de la sabiduría edafológica y el manejo de las tierras de cultivo de pueblos colonizados como África, Asia, Australia y América (Barrera-Bassols y Zink, 2000). En México existen registros como los de Fray Bernardino de Sahagún (1963) y Gibson (1996) que hablan de la utilización de una nomenclatura y caracterización de las tierras por parte de los habitantes del valle de México en la época de la colonia. Posteriormente, Williams y Ortiz (1981) demostraron a través del estudio de dos códices Santa María Asunción y Vergara (en Tepetlaoxtoc, Estado de México) el conocimiento del recurso suelo por los pobladores de hace 400 años aproximadamente. Esta clasificación (45 tipos de “tierras” diferentes representadas con glifos

específicos) puede ser expresada como formal y ser relacionada con otras clasificaciones populares. Además, concluyeron que el nombre de cada clase de tierra indica una característica o propiedad que la identifica y que guarda relación con atributos del suelo (textura, laboreo, fertilidad, color, entre otros). Gutiérrez-Castorena *et al.* (2017) reportaron que la estructura, origen y la formación de las terrazas fueron representados en los diferentes glifos.

La etnoedafología es una disciplina reconocida recientemente y que ha mostrado un avance significativo en los últimos treinta años. El trabajo de Barrera-Bassols y Zink (2000) es quizá una de las compilaciones más completas de esta área, conjuntando un total de 432 trabajos etnoedafológicos realizados en 61 países diferentes y por 127 etnias indígenas. Krasilnikov (2002) reporto más de 1000 tipos de suelo y paisajes en diferentes clasificaciones indígenas. No obstante, es en México, en donde se han realizado la mayoría de las investigaciones (Ortiz-Solorio *et al.*, 2005).

A pesar de esta fructífera producción las investigaciones se han centrado en la validación del conocimiento local con el técnico y la cosmovisión indígena acerca del suelo y los criterios (procesos o propiedades físicas y químicas) de clasificación de suelos (Luna *et al.*, 1988; Ortiz y Gutiérrez-Castorena, 1999; Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001); mientras que son escasos los reportes (solo una decena) que relacionan la clasificación local de tierras con el manejo agronómico de las tierras de cultivo (Sánchez *et al.*, 2002; Licona *et al.*, 2006).

A pesar del auge de los estudios etnoecológicos hasta la fecha son pocos los antecedentes de trabajos que se han llevado a cabo para relacionar de manera directa el manejo o prácticas agronómicas del suelo con las diferentes clases de tierra (suelo). De hecho, en México sólo se cuenta con un registro que relaciona la productividad del maíz en diferentes clases de tierras (Escalón, 1992). Este autor relacionó la clasificación local de tierras con la productividad de los diferentes manejos agronómicos empleados en el cultivo de Maíz en el estado de Veracruz.

En el panorama internacional, un primer estudio realizado en Nigeria por Osunade (1988) demuestra que los campesinos clasifican sus tierras por características físicas como color, drenaje, condición del suelo, materia orgánica, densidad aparente y presencia de lombrices. En algunos casos la clasificación se lleva a cabo en ciertas temporadas del año y cuentan con una escala del grado de regeneración (en base a su fertilidad) con el que cuenta un sitio.

Dialla (1993) realizó un estudio en Burkina Faso, África en el que encontraron que la clasificación local de suelos empleada por la tribu Mossi también está basada en ciertas

características como el color, textura, consistencia, localización geográfica, drenaje, fertilidad o cobertura vegetal. Además, los agricultores locales clasifican las tierras en términos de su potencial productivo y el tipo de laboreo que se necesita realizar. Obteniendo cuatro clases de suelo mayor y trece tipos de suelo derivados.

Otro ejemplo de la clasificación campesina y el manejo agronómico de suelos que realiza la tribu Mossi son los sistemas de producción en anillos (Prudencio, 1992). La localización de estos depende directamente de la ubicación de la casa del campesino (está debe construirse al centro de los anillos y es donde los productores consideran los suelos más fértiles). El manejo depende de la fertilidad del suelo que ha sido elegido y para conservarla los Mossi ocupan inter-cultivos entre los anillos, rotaciones parciales entre anillos, la introducción de leguminosas y la aplicación de estiércoles o enmiendas orgánicas. En el caso de las prácticas de labranza están relacionadas con la proximidad de los terrenos, es decir los anillos más cercanos son en los que se practica la labranza mientras que en los anillos más alejados (1 Km o más) es prácticamente nula.

Hebarurema y Steiner (1997) llevaron a cabo una investigación en el Sur de Ruanda con el objetivo de conocer los criterios empleados en la clasificación campesina de tierras, correlacionar esta clasificación con el tipo de gestión agronómica y contrastarla con la clasificación científica. Sus resultados mostraron que la clasificación campesina está basada en su potencial agrícola (productividad) y las propiedades que facilitan la trabajabilidad del mismo, los principales criterios empleados por los campesinos para clasificar sus tierras son la fertilidad, profundidad, la estructura y el color; mientras que otras características menos empleadas son la presencia de plantas indicadoras, la textura el drenaje y la consistencia. Concluyeron que la clasificación científica no está correlacionada con la clasificación campesina debido a que la primera toma en cuenta los procesos pedogenéticos del suelo y la segunda sólo atributos de productividad, razón por la cual pueden generarse huecos en la información y una mala planeación agrícola.

Lawas y Luning (1998) propusieron acoplar un sistema de información geográfica (GIS) y el análisis de componente principales (ACP) para mejorar la elección de cultivos y obtener mejores ingresos económicos. La información fue vertida por los agricultores por medio de entrevistas en donde expresaron la clasificación y el manejo que dan a sus suelos. Según los autores la toma de decisiones dependerá de los objetivos de uso del suelo (que cultivo agrícola se desea), el manejo y la maquinaria con la que se cuente y el contexto socioeconómico del productor.

En una revisión bibliográfica Talawar y Rhodes (1998) mencionan que la correlación entre los estudios etnoedafológicos con los procedimientos de gestión del suelo no ha sido del todo satisfactoria, debido a que los agricultores se preocupan principalmente por propiedades físicas y químicas y deja de lado la relación del cultivo con el suelo. Sin embargo, si los estudios etnoecológicos son bien dirigidos y con objetivos claros el conocimiento de los agricultores va más allá de las propiedades edáficas ya que entienden también una serie de conceptos agroecológicos y socioculturales que pueden responder los “por qué” de la clasificación y manejo del suelo. Los autores proponen que las clasificaciones de suelo basadas en el tipo y uso de la vegetación proveen de información detallada que puede favorecer en la toma de decisiones agroecológicas.

Gracias al conocimiento detallado de muchos pueblos originarios o de la conjunción de saberes algunos pueblos que presentan un mestizaje alto se ha demostrado que el conocimiento campesino puede aminorar no solo los costos, sino también el trabajo necesario para realizar desde inventarios de suelo, vegetación, recursos naturales, etc. Sin embargo, es hasta apenas hace 20 años que los trabajos de investigación en esta área han mostrado una tendencia al alza. Por lo que entonces el enfoque etnoecológico permite en conjunto con los conocimientos técnicos un mayor entendimiento de los problemas locales (y que pueden ser generalizados a una región, municipio e incluso a nivel estatal) que hace que la toma de decisiones sea la más adecuada que con otro tipo de enfoques.

En su mayoría los estudios que relaciona el manejo agronómico con los tipos o clases de tierras presentes en algún sitio se centran en la productividad, fertilidad o trabajabilidad de la esta misma. Sin embargo, ninguna investigación ha tratado de relacionar los manejos y las clases de tierras con la descomposición de las raíces. Este fenómeno es de vital importancia para el desarrollo óptimo de los cultivos, como una fuente importante de nutrimentos y en la generación de biomasa aérea (relación raíz-vástago).

DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES

El recambio y la descomposición de las raíces en el suelo es un componente central que regula la transferencia de carbono (C) y el ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Aber *et al.*, 1985; Bloomfield *et al.*, 1996); además representa un flujo importante de CO₂ a la atmósfera (Silver y Miya, 2001).

La mortalidad y descomposición de las raíces finas (<2mm) representan un gran costo metabólico para las plantas, así como un potencial sumidero de C en el suelo. El tamaño de este último puede ser significativo dependiendo de la estimación global de C, particularmente en ecosistemas con una alta asignación de biomasa subterránea como los pastizales y algunos bosques tropicales (Nepstad *et al.*, 1994; Silver *et al.*, 2000). La descomposición de raíces es también una fuente importante de nutrientes minerales en el suelo (Aerts *et al.*, 1992) y por lo tanto afecta las tasas de productividad primaria en ambientes con limitación de nutrimentos (Silver y Miya, 2001).

Arunachalam *et al.* (1996) estudiaron la descomposición de las raíces y la mineralización de N y P en bosques tropicales, demostrando que la descomposición de las raíces en estos ecosistemas está caracterizada por tres fases de pérdida de biomasa: 1) pérdida debida al tiempo de colonización de la micro biota del suelo (60 días aproximadamente), 2) pérdida por la utilización de la energía libre que es utilizada por los microorganismos y la pérdida de compuestos solubles en agua y carbohidratos no estructurales y 3) descomposición de materiales recalcitrantes y con altos contenidos de lignina. También concluyeron que las tasas de descomposición aumentan en la temporada de lluvias debido principalmente al aumento de la temperatura, la condición de humedad del suelo y la actividad microbiana.

King *et al.* (1997) corroboraron que la descomposición de las raíces consta de dos etapas principales: 1) pérdida de compuestos inorgánicos y solubles en agua y 2) decremento de biomasa de acuerdo a los contenidos de materiales lignificados. Se percataron que en la primera fase la tasa de descomposición se correlacionó con la clase de tamaño y concentración de nutrientes de las raíces; mientras que en la segunda fue similar en todos los tratamientos. En esta última fase el riego y la fertilización no modificaron en absoluto las tasas de descomposición. La mineralización neta de N, P, K, Ca y Mg se vio afectada por el diámetro de las raíces (a menor diámetro mayor mineralización) y las raíces más gruesas resultan ser un sumidero de N, Ca y Mg.

Dodd y Mackay (2011) midieron las tasas de descomposición de raíces de pasto raigrás sometido a diferentes dosis de fertilización de N y P, encontrando que a mayores dosis de fertilizante la producción de raíces aumenta considerablemente. La descomposición no presentó diferencias significativas en ningún tratamiento; aunque los autores mencionan que las mayores cantidades de N no fueron suficientes para que se pudieran observar cambios considerables en la tasa de descomposición como lo menciona la mayor parte de la literatura.

De Graff *et al.* (2013) probaron la hipótesis de que las variaciones en la arquitectura de las raíces producen diferentes tasas de descomposición en cultivos de *Panicum virgatum* de diferentes localidades y encontraron que: 1) la longitud radical era diferente entre cultivos, 2) las tasas de descomposición varían entre cultivos; sin embargo, contrario a la literatura estas diferencias no se correlacionaron con la relación C:N de las plantas y los autores atribuyen este fenómeno a la variabilidad genética de cada cultivo aun siendo la misma especie, 3) el diámetro de las raíces afecta la tasa de descomposición y el carbono orgánico del suelo que estas producen y 4) la mezcla de raíces de diferentes diámetros no condujo a aumentos sinérgicos en la descomposición.

von Haden y Dornbush (2014) determinaron que la descomposición y la cantidad de C están relacionadas inversamente con el contenido de humedad del suelo y con la posición altitudinal o geomorfológica donde se encuentren las plantas. Demostraron que de acuerdo con la posición en el relieve la descomposición de raíces finas sufre un ligero decremento en el caso de las partes bajas en comparación con las partes altas. La explicación a este fenómeno refiere principalmente a que la disponibilidad del agua es mayor en las partes bajas. Este aumento también se cuantificó en la cantidad de C orgánico y es atribuido a que las plantas cambiaron la composición de sus poblaciones en los sitios altos y bajos, reduciendo los efectos por la disponibilidad del agua en el caso de las plantas cultivadas en tierras altas.

Sariyildiz (2015) monitoreó las raíces finas (<2 mm) y delgadas (2-5 mm) de tres especies forestales de Turquía (*Alnus glutinosa*, *Picea orientalis* y *Pinus sylvestris*) en dos posiciones y aspectos de pendiente. Concluyó que las tres especies responden de manera similar al suelo y las condiciones ambientales. Fue la variación en la composición química de las diferentes especies en especial la C:N la que explica las diferencias en las tasas de descomposición de las tres especies en diferentes posiciones y aspectos de pendiente. Las raíces finas se descompusieron a tasas más aceleradas que las delgadas. Asimismo, la calidad del sustrato y la aireación resultaron ser parámetros importantes que influyen de manera significativa la pérdida de biomasa radical.

Se puede entonces concluir que tres son los factores más importantes en la descomposición de las raíces.

- Las variables climáticas que demuestran relación con el recambio y descomposición de las raíces son la latitud del sitio, la temperatura, la humedad, la precipitación y los coeficientes de evapotranspiración (Pregitzer *et al.*, 1993; Hendrick y Pregitzer, 1997; Berg *et al.*, 1998; Nadelhoffer, 2000).

- La composición química de las raíces es un factor determinante en el control de los patrones de descomposición. La formación de oxalatos de calcio en las raíces de algunas plantas permite mayor acceso a las asociaciones micorrízicas y bacterianas (Cromack *et al.*, 1979); además, las concentraciones de Ca regulan el movimiento de agua y la división celular (McLaughlin y Wimmer 1999). La relación C:N es un indicador para predecir los patrones de descomposición, ya que valores mayores de 75, muestran una lenta descomposición debido a la presencia de grandes cantidades de lignina y taninos (Heal *et al.*, 1997). Por último, los contenidos de lignina en las raíces influyen sobre los patrones de descomposición, limitando el accionar enzimático y el acceso a la materia orgánica de las raíces por parte de los microorganismos (Mun y Whitford 1998).
- La longevidad individual de las raíces debido a variaciones genotípicas y condiciones creadas por micrositos (Joslin *et al.*, 2000), y los patrones individuales del desarrollo de las raíces (longitud, diámetro y densidad), son otros de los factores que limitan o potencializan las tasas de recambio (Boot, 1990).

Adquisición de Carbono por medio de las raíces

La rizosfera alberga una gran cantidad de actividad biológica debido al alto número de microorganismos e invertebrados a comparación del suelo donde las raíces no tienen influencia en el suelo (suelo a granel). Este sistema altamente activo asociado con raíces de la planta es soportado principalmente por la entrada de C a partir de las raíces vivas, que pueden incluir materiales desprendidos (células y mucílago), pelos radicales muertos y los exudados radicales. Esta entrada, junto con la renovación de raíces, puede representar hasta 50% de la producción primaria neta en diversos ecosistemas (Whipps, 1990). El flujo de energía, la entrada y salida de C en los ecosistemas constituye una importante área de interés en la ecología, por lo que es necesario determinar la magnitud y aportes de C de las interacciones entre los tres componentes bióticos del suelo: raíces, micro flora y fauna (Cheng y Gershenson, 2007).

Teniendo en cuenta todos los posibles sumideros y flujos de C en los ecosistemas, el ciclo del C subterráneo (el que se lleva a cabo en la rizosfera) es cada vez más reconocido como uno de los componentes de mayor importancia dentro del ciclo del C en general (Zak y Pregitzer, 1998). A nivel mundial se ha estimado que la entrada de C en el suelo puede ser tan grande como 60×10^{15} g año⁻¹, aproximadamente un orden de magnitud mayor que la tasa anual global de la quema de

combustibles fósiles y otras emisiones antropogénicas, que es de 6×10^{15} g año⁻¹ actualmente (Post *et al.*, 1990).

El flujo subterráneo de CO₂ puede dividirse en dos procesos: 1) la respiración de la rizosfera (raíces y sus derivados) incluyendo la respiración de las raíces y la respiración microbiana de materiales y 2) la descomposición microbiana del suelo empleando la materia orgánica del suelo (SOM) o derivados de las raíces. Estos dos procesos actúan por separado; sin embargo, pueden estar ligados a través de interacciones de la rizosfera, la cual ejerce un estímulo (efecto de cebado) o una influencia supresora en la descomposición de la materia orgánica del suelo (SOM) (Cheng, 1999).

Para entender de mejor manera el aporte de carbono por parte de las raíces al suelo hay que entender las diferentes entradas de C a la rizosfera y sus relaciones:

- Biomasa radical. Pueden incluirse raíces vivas o muertas
- Otros materiales de origen vegetal. Son denominados comúnmente como rizo-depósitos y son materiales que son transformados fácilmente por la biota del suelo y son mezclados con materiales orgánicos del suelo.
- Dióxido de carbono. Proveniente de la respiración de las raíces o bien de los simbioses de la raíz (micorrizas, nódulos) o la respiración microbiana de la rizosfera (Cheng y Gershenson, 2007).

Descomposición de las raíces en suelos agrícolas

La descomposición de las raíces en suelos de uso agrícola ha sido ampliamente investigada en relación a las prácticas de fertilización (N principalmente), cultivos de cobertura y tipos labranza. En estas investigaciones se ha concluido que las tasas de producción y descomposición de las raíces de cereales como el maíz responden de manera diferencial a la fertilización y uso eficiente del N; además, se han centrado en la producción de variedades vegetales que maximicen la asimilación de N (Li *et al.*, 2017). Otra línea de investigación es la de implementar cultivos de cobertura y fijadores de N que minimicen las pérdidas por volatilización o lixiviación de N y así los suministros de N en el suelo se mantengan constantes para el crecimiento de los cultivos principales (cereales) (Herrera *et al.*, 2017). Por último, se han ensayado diferentes prácticas de manejo agronómico como la labranza (convencional y cero) y las adiciones de materia orgánica modifican la

producción, descomposición y distribución de las raíces (Martínez *et al.*, 2008; Torres-Guerrero, 2013).

Noordwijk *et al.* (1994) estudiaron el efecto de dos sistemas de cultivo: convencional e integrado (el cual incluye altas densidades de siembra, riego, enmiendas orgánicas y reducción de labranza) sobre la producción y mortalidad de las raíces de trigo y remolacha azucarera. Concluyeron que la diferencia fueron mínimas entre ambos manejos, pero que en la convencional se observó inmovilización del N a diferencia del manejo integrado que permite la movilización del N para cultivos posteriores.

Swinnen *et al.* (1995) rechazaron la hipótesis que las plantas invierten más C en raíces y rizodepósitos en sistemas con baja cantidad de nutrientes (sistema integrado con labranza reducida) para maximizar la absorción. Sin embargo, observaron que los sistemas de producción integrada registraron el doble de rizodepósitos y C orgánico en raíces en comparación con los sistemas de producción convencional.

Por su parte, Martínez *et al.* (2008) compararon la producción y distribución de raíces en trigo en labranza convencional y cero labranza. Encontraron que la implementación de la cero labranza mejora los parámetros físicos del suelo como la agregación y conductividad hidráulica, permitiendo el desarrollo óptimo de las raíces en los primeros 15 cm de profundidad. En contraste, el suelo bajo labranza convencional decreció en calidad física y como consecuencia el crecimiento de las raíces se vio dificultado por el colapso de la estructura del suelo.

Perkons *et al.* (2014) evaluaron la influencia de los cultivos precedentes (trigo, cebada y canola) sobre estructura del suelo y la densidad radical de cultivos anuales (festuca, avena y escarola). Concluyeron que los sistemas de raíces fibrosas facilitan el crecimiento de las raíces de cultivos posteriores hasta la profundidad máxima de enraizamiento, mientras que los cultivos con sistema taproot (es decir, una raíz principal y ramificaciones secundarias y terciarias), promueven un mayor número de bioporos y las densidades radicales decrecen en la parte superficial del suelo.

Mu *et al.* (2016) evaluaron la respuesta del crecimiento de las raíces maíz a dos diferentes profundidades de labranza (15 y 30 cm) y aportes de materia orgánica. La investigación demostró que la labranza profunda (30 cm) y la adición de materia orgánica está asociada con un ambiente favorable para el desarrollo de las raíces, permitiendo una mayor disponibilidad de agua, a diferencia de la labranza convencional sin adición de residuos la cual produjo la compactación del suelo.

Padilla *et al.* (2017) compararon dos sistemas de manejo agronómico de labranza, fertilización nitrogenada y riego en cultivos de chile. Los tratamientos consistieron en labranza a 10 cm, corrección de riego y fertilización nitrogenada con y sin adición de composta. Las conclusiones de esta investigación fueron que las raíces disminuyen su producción en el tratamiento con la adición de composta debido a la salinidad asociada a la misma y aumentan la profundidad de las raíces hasta 30 cm. En el tratamiento donde no se adicionó composta la densidad aparente decreció y la producción de las raíces aumentó.

Herrera *et al.* (2017) comprobaron la descomposición de las raíces de maíz con altos y bajos contenidos de nitrógeno y cultivos de cobertura (mostaza, girasol y phacelia) y concluyeron que la descomposición no es afectada por los cultivos de cobertura. Por el contrario, durante la temporada de crecimiento de la raíz de trigo, la descomposición de la mostaza fue en promedio dos veces mayor para phacelia y girasol como consecuencia de una mayor producción de raíces con una relación C/N significativamente mayor en comparación con los otros cultivos de cobertura.

A pesar de que existe un buen número de investigaciones acerca de la producción y descomposición de las raíces en suelos agrícolas, no hay hasta la fecha una metodología estandarizada para cuantificarla, por lo que los resultados no pueden relacionarse en la mayoría de los casos, sólo con la biomasa o densidad radical se pueden hacer este tipo de comparaciones.

TÉCNICAS PARA CUANTIFICAR LA DESCOMPOSICIÓN DE LAS RAÍCES

La observación y cuantificación de las raíces es una tarea complicada ya que se encuentran enterradas. No existe hasta la fecha algún método estandarizado para medir la descomposición de las raíces, debido a que los objetivos de las investigaciones en este campo son muy diversos y tratan de correlacionar factores distintos como fisiológicos, morfológicos y funcionales de la interfase raíz-suelo, lo que no ha permitido llegar a un consenso para evaluar este proceso tan importante en la rizosfera.

Prácticamente todos los sistemas radicales han sido ensayados en cada uno de los métodos, sin que esta variable afecte los resultados obtenidos (Silver y Miya, 2001). Son más bien los problemas de limpieza, artificialidad e instalación, los parámetros que impulsan al investigador a elegir uno u otro método.

Los métodos más empleados en el análisis de la descomposición de las raíces son enlistados a continuación.

Macetas enterradas

En este análisis primero las raíces son colectadas, lavadas y refrigeradas hasta su uso. Las macetas (pueden ser plásticas o de cerámica) son rellenas con suelo sin raíces, para después adicionar las raíces. Posteriormente, se tapan e invierten las macetas para evitar el crecimiento de nuevas raíces. La cuantificación se hace por diferencia de pesos al tiempo $(n+1)-n$ (Gijssman *et al.*, 1997).

Zanjas de observación

El método consiste en realizar zanjas en los surcos de cultivo (puede ser utilizado en cultivo de granos o en especies forestales); es decir, excavar la zanja del tamaño que se desee, para posteriormente eliminar las raíces y el litter del suelo con el que se rellenara la zanja. Una vez construida la zanja y el suelo limpio, se puede comenzar a cultivar y hacer el muestreo consecutivo con núcleos y estimar la mortalidad (Silver y Vogt, 1993).

Bolsas de litter

Un método modificado de las técnicas forestales para medir la descomposición de la capa de litter. La modificación consiste en obtener raíces (vía núcleos o sistemas radicales completos) limpias y secas para introducirlas en bolsas de nylon con apertura de malla menor al diámetro de las raíces. Luego, las bolsas son incubadas en el suelo por tiempo n y finalmente extraídas para cuantificar la biomasa perdida. Este es el método más utilizado en la actualidad debido a su simplicidad y su bajo costo y requerimientos técnicos (Arunachalam *et al.*, 1996).

Núcleos de crecimiento interno

Una variación de las bolsas de litter, donde cilindros de nylon con apertura de malla <2 mm son rellenos con suelo tamizado y sin raíces, para ser cerca del área de crecimiento radical (aproximadamente en un radio de 10 cm del tallo de la planta) con una orientación de 45° y obtener

mayor superficie de contacto. En este método los núcleos pueden ser remplazados en el periodo de tiempo deseado, sin que la planta tenga que sea dañada en su totalidad (Steingrobe *et al.*, 2001).

Minirizotrones

Existen diferentes variantes y tamaños de rizotrones (mini y macro) que consisten en un tubo de observación transparente con una cámara acoplada en su interior. El éxito en los resultados está dado por la orientación y la instalación de estos aparatos. Los resultados que se obtienen son imágenes consecutivas o videoclips con los que se puede estimar la producción o mortalidad en intervalos de tiempo (Phillips *et al.*, 2000).

Marcaje con isótopos

Es una técnica de medición indirecta de la descomposición de las raíces mediante el marcaje con isótopos estables o radioisótopos. Los más empleados son el ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N y ^{15}N . Con este método se puede hacer un seguimiento de los componentes de las raíces después de descomponerse y es muy preciso si se controlan las condiciones (entradas y salidas) del experimento (Bingham *et al.*, 2000).

Respirómetro

Aparatos que permiten medir la respiración celular de las raíces. Estos cuentan con micro-electrodos capaces de medir las tasas respiratorias de células individuales u órganos. Son empleados principalmente en investigaciones muy específicas en fisiología celular (Lamboursain *et al.*, 2002).

Sensores fisiológicos de auto-referencia

Son micro-sensores que funcionan bajo el supuesto de la ley de respuesta nertsiana, donde se mide la resistencia eléctrica en una distancia específica (en este caso las raíces). Con base en el contenido de los iones específicos (para el caso de la descomposición de raíces se emplea el O_2) la resistencia es de menor o mayor magnitud y es así como se puede cuantificar la cantidad de O_2 y de manera indirecta si las raíces están vivas o muertas (Porterfield, 2002).

ANÁLISIS DE IMÁGENES EN SECCIONES DELGADAS DEL SUELO

El uso de secciones delgadas de suelo y sus descripciones micromorfológicas es una alternativa para analizar los diferentes componentes del suelo, en este caso las raíces. Sin embargo, si se desea aplicar el procesamiento digital de imágenes en microfotografías de secciones delgadas el problema de representatividad es común; es decir las imágenes que se ocupan son tan pequeñas que no sirven para correlacionar las raíces con otros componentes y si las imágenes son grandes a menudo su resolución es muy baja. En este sentido, el análisis de mosaicos de alta resolución permite la cuantificación y distribución de los componentes del suelo. Varias han sido las investigaciones al respecto del uso de análisis de imágenes para cuantificar rasgos edáficos en imágenes provenientes de secciones delgadas de suelo los cuales se describen a continuación:

Protz *et al.* (1992), son quizá los iniciadores de la línea de investigación que propone el análisis de secciones delgadas a través del procesamiento digital de imágenes. Los autores desarrollaron un sistema para clasificar los componentes del suelo, incluso cuando presentan coloraciones y morfologías disimiles. Las imágenes fueron obtenidas con un escáner convencional y dos tipos de iluminación (polarizada plana, y con un colorante sensible a la luz UV), cada una de ellas fue capturada en 5 canales con una resolución de $23 \mu\text{m pixel}^{-1}$. El sistema de clasificación se basó en la obtención de firmas espectrales en el rango de la luz UV mediante clasificación supervisada en el software PCI.

Terribile y Fitzpatrick (1994; 1995) añadieron técnicas de procesamiento multi-espectral (empleadas comúnmente en análisis de imágenes satelitales) y multi-capa para cuantificar diferentes componentes del suelo en imágenes capturadas en diferentes tipos de iluminación: luz polarizada plana (LPP), luz polarizada cruzada (XPL), luz circular y luz parcialmente cruzada. Además, añadieron la corrección geométrica de las imágenes y clasificaron de manera no supervisada y supervisada en Erdas Imagine. Para dichas clasificaciones se usó una imagen de referencia e imágenes de clasificación, la transformación de componentes principales para reducir datos redundantes en las imágenes y finalmente un análisis de anisometría para identificar diferentes formas o patrones en las imágenes. Los autores concluyeron que el uso de diferentes tipos de iluminación acoplados con un algoritmo de morfología permite diferenciar los componentes del suelo en imágenes con una resolución de 512×512 pixeles ($4.2 \mu\text{m pixel}^{-1}$).

Protz y VandenBygaart (1998) publicaron un protocolo de análisis de imágenes útil y simple para cualquier estudio de micromorfología cuantitativa y es empleado rutinariamente en la universidad de Guelph, Ontario, Canadá. En este sistema, las secciones delgadas son escaneadas con una platina automatizada capaz de adquirir imágenes en LPP, XPL y luz reflectada (fluorescencia) a diferentes longitudes de onda cada una. Asimismo, el aparato era capaz de controlar el área a digitalizar y obtener diferentes magnificaciones. Posteriormente, el análisis y cuantificación se realizaban usando una clasificación supervisada en PCI.

Adderley *et al.* (2002) fueron los primeros en realizar la construcción de mosaicos de imágenes tomadas de manera secuencial. El estudio se centra en la delimitación y cuantificación de los objetos del suelo (en un contexto geoarqueológico) con el uso de un sistema de clasificación basado los colores de la carta Munsell (matiz, intensidad y croma). Los mosaicos se elaboraron con 88 imágenes de 576×760 píxeles c/u y con un área de traslape de 45 píxeles. La platina automatizada era capaz de adquirir imágenes en LPP y luz polarizada oblicua. El procesamiento digital de las imágenes se realizaba segmentaciones en AnalySIS® para finalmente buscar la correspondencia de cada categoría con la carta de color Munsell.

Aydemir *et al.* (2004) usaron un sistema automatizado para la obtención de imágenes a través de un escáner de alta resolución acoplado a Erdas Imagine para caracterizar los componentes del suelo. Las imágenes resultantes tenían 24 bits de profundidad de color (color verdadero) con una resolución de $13 \mu\text{m pixel}^{-1}$ y podía digitalizar áreas hasta de 6.3 cm^2 . Los componentes se delimitaban por medio de clasificaciones no supervisadas de acuerdo con su grado de saturación RGB. Después, eran obtenidas mascarar de los diferentes componentes para su comprobación en un microscopio petrográfico según el conocimiento del micromorfólogo.

Maragos *et al.* (2004) generaron un sistema automatizado basado en las propiedades espectrales y la geometría de los componentes del suelo. Además, con el resultado de la cuantificación de los componentes del suelo un programa computarizado estimaba el potencial de fertilidad del suelo analizado. Para ser llevado a cabo se hizo una colecta de muestras de suelo representativos de Grecia para generar una base de datos de indicadores físicos y químicos de fertilidad. El análisis de imágenes incorporó la extracción geométrica, la detección y marcaje y la segmentación de los componentes del suelo que permitían clasificarlos no solo por su grado de brillantez sino por sus texturas.

Gargiulo *et al.* (2013) estudiaron las acumulaciones de Fe y carbonatos empleando el análisis de imágenes en el software Solicon-PC 10. Las secciones delgadas fueron teñidas con un colorante sensible a la luz UV para iluminar la banda azul de las imágenes y obtener el grado de brillantes de los componentes antes mencionados. Después, se construyeron mosaicos de cuatro fotografías (3×5 mm cada una) con una resolución de 10 $\mu\text{m pixel}^{-1}$. Finalmente, los histogramas de cada mosaico fueron balanceados y se realizó una clasificación supervisada para obtener las cuantificaciones.

Carpentier y Vandermeulen (2016) desarrollaron un sistema de adquisición de imágenes de secciones delgadas compuesto de un una cámara de alta resolución y paneles polarizadores. El escáner petrográfico que proponen es capaz de obtener magnificaciones de 4×. Por último, las secciones delgadas pueden ser fotografiadas en su totalidad para generar un mosaico compuesto de cuatro fotografías que cubren una superficie de 30 cm^2 . Cabe señalar que este escáner es propuesto sólo para análisis micro morfológicos a meso escala.

Sauzet *et al.* (2017) analizaron las acumulaciones e iluviación de arcilla construyendo mosaicos de alta resolución de 49 $\text{cm}^2 \text{cm}$ y resolución de 5.3 $\mu\text{m pixel}^{-1}$ con ayuda de una platina automatizada. Esta investigación fue realizada con el uso de software y la cuantificación de las arcillas se llevó a cabo con clasificaciones supervisadas en donde los autores seleccionaron las bandas verde y roja. Campos de entrenamiento (polígonos) fueron dibujados en donde el micromorfólogo reconoció la arcilla y las áreas mayores de 7×7 pixeles se clasificaron como el componente (poros, agregados o arcillas). Esta investigación fue la primera en implementar el análisis estadístico de la precisión obtenida en las clasificaciones supervisadas a través de las matrices de confusión.

Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016; 2018) desarrollaron mosaicos que hasta el momento registran la mayor resolución (2 nm pixel^{-1}) analizados con algoritmos de percepción remota en ArGis y Erdas Imagine. En un primer trabajo, utilizaron esta técnica para delimitar, aislar y cuantificar bacterias y sus asociaciones con otros componentes del suelo (minerales, poros y agregados) con la ayuda de tinciones en las secciones delgadas dos tipos de iluminación (LPP y luz fluorescente). El resultado final fue la cuantificación precisa de colonias bacterianas y la elaboración de mapas temáticos que permiten relacionar diferentes escalas.

La segunda investigación logro determinar los componentes del suelo de diferentes suelos y los procesos necesarios para aislar y cuantificar dichos componentes. Para cada componente es

utilizada una técnica diferente y la mayoría de ellas está basada en el uso de clasificaciones supervisadas para obtener el grado de brillantes de cada componente, sin embargo, a diferencia de trabajos anteriores los autores incorporaron diferentes tipos de iluminación en una sola imagen usando algebra de mapas y procesos geománticos de rutina. Finalmente, la correlación entre la precisión de las clasificaciones desarrolladas por el usuario (micromorfólogo) y el productor (software) son evaluadas con ayuda del índice de Kappa Cohen y las matrices de confusión.

En conclusión, la línea de investigación que incorpora el análisis de imágenes de secciones delgadas de suelo se ha desarrollado en conjunto con la aparición y evolución de software y hardware capaz de incorporar mayor resolución y procesos lógicos (algoritmos) de clasificación. En el Cuadro 2 es posible observar los aciertos y las limitantes de cada investigación con el paso del tiempo.

Cuadro 2. Principales investigaciones acerca del procesamiento digital de imágenes y su aplicación en micromorfología para la delimitación de los diferentes componentes del suelo.

Autores	Componente del suelo cuantificado	Ventajas	Desventajas
Protz et al. (1992)	Granos, porosidad, motas, MO, concreciones de Mn, carbonatos y zonas de depleción.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Empleo de un software para análisis espectral de imágenes (PCI). ✓ Uso de luz UV. ✓ Uso de secciones delgadas completas. ✓ Separación de bandas y canales de cada imagen permite mejor clasificación 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Imágenes de baja resolución (escáner) ✗ Un solo tipo de luz subestima o sobrestima granos minerales ✗ Clasificación no es capaz de delimitar rasgos pequeños. ✗ Escaneo modifica el color verdadero de los rasgos.
Terribile y FitzPatrick (1992)	Cuarzo, revestimientos de arcilla, matriz del suelo y porosidad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilizan imágenes aisladas de baja resolución. ✓ Uso de varios tipos de luces. ✓ Uso de firmas espectrales separadas por bandas. ✓ Uso de clasificación supervisada y no supervisada para comparar. ✓ Desde ese tiempo proponían el uso de mosaicos, aunque los autores no lo llevaron a cabo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Dificultad para detectar objetos pequeños ✗ La clasificación no supervisada no era capaz de delimitar los componentes del suelo. ✗ No hay un análisis estadístico de la certeza con la que se hace la clasificación ✗ Solo sobreponen imágenes en diferentes tipos de luces, lo que complicaba la delimitación. ✗ Uso de álgebra de mapas
Terribile y Fitzpatrick (1995)	Segmentación de todos los rasgos presentes en Vertisol, Gleysol y un suelo con procesos de argiluvación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uso de diferentes tipos de luces. ✓ Acoplar un análisis de morfología para mejorar la delimitación. ✓ 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Solo cubren áreas de 1 mm². ✗ Fotos de 8 bits y baja resolución. ✗ Luz UV y longitud de onda no mejoran clasificación. ✗ ✗ La primera diferenciación es hecha con una clasificación no supervisada y arroja demasiadas categorías (30)
Protz y VandenBygaart (1998)	Porosidad, matriz orgánica, revestimientos de arcilla, carbonatos y nódulos de Fe.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Las imágenes son descompuestas en bandas para la identificación de los componentes del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Se utiliza un solo tipo de luz para separar (no hay álgebra de mapas) ✗ Solo delimitan componentes > 30 μm ✗ Las magnificaciones solo pueden llegar a 25x. ✗ A pesar de tener secciones delgadas completas nunca se generaron mosaicos.

Continuación Cuadro 2.

Autores	Componente del suelo cuantificado	Ventajas	Desventajas
Adderley et al. (2002)	Objetos pequeños del suelo (geoarqueología)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Empleo de mosaicos que permite abarcar mayores áreas que imágenes aisladas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Mosaicos pequeños y de baja resolución. ✗ El sistema basado en la carta Munsell no es capaz de reconocer todas las tonalidades de imágenes de alta resolución y los artefactos en las secciones modifican sus resultados. ✗ No utilizan la sobre posición para mejorar sus resultados. ✗ Utilizan una clasificación no supervisada. ✗ El análisis solo está enfocado a objetos y no guarda relación directa con los componentes.
Aydemir et al. (2004)	Constituyentes minerales, no minerales no cristalinos y pobremente cristalinos y porosidad del suelo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Empleo de mosaicos escaneados mejor resultado que imágenes aisladas. ✓ Comprobación de clasificaciones supervisadas y no supervisadas en microscopio petrográfico. ✓ Empleo de imágenes de 24 bits. ✓ Separación en capas de cada uno de los constituyentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Uso de escáner. ✗ A pesar de tener imágenes en color real (24 bits) la resolución de los mosaicos resulta muy baja. ✗ Uso de un solo tipo de luz conduce a mala clasificación en cuarzo y otros constituyentes. ✗ No hay un análisis estadístico de las clasificaciones supervisadas para demostrar su precisión.
Maragos et al. (2004)	Todos los constituyentes de una sección delgada.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Empleo de un sistema de procesamiento a objetos. ✓ La delimitación no solo se basa en las firmas espectrales, incorpora análisis de textura, granulometría y geométricos. ✓ Se hace una comprobación post clasificación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Las imágenes aisladas no ofrecen la perspectiva adecuada de toda una sección delgada. ✗ El análisis de fertilidad y concordancia bioquímica, no toma en cuenta factores edáficos claves para correlacionar con la fertilidad del suelo. Por ejemplo, el contenido de materia orgánica.
Gargiulo et al. (2013)	Carbonato de calcio y óxidos de hierro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uso de mosaicos con colorante para UV para usar la banda azul para medir porosidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Los mosaicos son de baja resolución. ✗ Solo se emplea un solo tipo de luz. ✗ Sobrestimaciones en el óxido de Fe por confundir colores de la masa basal con segmentación simple
Carpentier y Vandermeulen (2016)	Ninguno	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El escáner permite obtener mosaicos compuestos de cuatro fotos con 3.6 millones de píxeles. ✓ Magnificación de 40x. ✓ Capaz de adquirir imágenes en LPP y LPC 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ No ofrece resolución por píxeles. ✗ Los mosaicos tienen alta resolución, pero resultan pequeños en comparación de los obtenidos. Pueden servir para delimitar y cuantificar componentes macro y no micro.

Continuación Cuadro 2.

Autores	Componente del suelo cuantificado	Ventajas	Desventajas
Sauzet <i>et al.</i> (2017)	Porosidad y revestimientos de arcilla.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uso de mosaicos de alta resolución. ✓ Uso de platina automática. ✓ Elección de REA para cuantificar de manera estadística. ✓ Comprobación precisión en las y clasificaciones segmentaciones mediante matrices de confusión. ✓ Separación en bandas ofrece un análisis más simple por cada banda. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Uso de un solo tipo de luz. ✗ Pudieron acoplar un filtro o una transformación rápida de Fourier antes de la binarización de las imágenes para la porosidad y evitar confusiones morfológicas y cálculo de operaciones extra en la segmentación.
Gutiérrez Castorena <i>et al.</i> (2016)	Bacterias, agregados, minerales y poros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Obtención de micromapas temáticos que muestran relación con otros componentes. ✓ Conteo específico de colonias bacterianas. ✓ La resolución permite hacer relaciones multiescala. ✓ Relación específica de bacterias con agregados del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Uso de solo 2 tipos de luces ✗ Tinción para un amplio número de bacterias (no específico). ✗ Áreas pequeñas 1 cm. ✗ Mosaicos de gran tamaño hacen lento el procesamiento de las imágenes. ✗ No hay separación entre bandas, se trabaja con imágenes 24 bits sin transformarlas.
Gutiérrez Castorena <i>et al.</i> (2018)	Todos los componentes del suelo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cuantificación específica de edaforrasgos de interés. ✓ El uso de diferentes tipos de luz permite una mejor delimitación. ✓ Las diferentes magnificaciones permiten relaciones interescala. ✓ Alta precisión en las clasificaciones supervisadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Es necesaria gran cantidad de memoria para el procesamiento de los mosaicos. ✗ Los componentes del suelo requieren diferentes procesos metodológicos para su cuantificación. ✗ Las imágenes no son tratadas antes de ser procesadas en un SIG.

LITERATURA CITADA

- Abasolo P., V. E., 2001. Cambio tecnológico y agricultura en San Pedro Tlaltizapan, Estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialidad de Agroecología. Instituto de Fitosanidad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México
- Aerts R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*. 79:439-449.
- Aber J.D., Melillo J.M., McLaugherty C.A. 1990. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Canadian Journal of Botany*. 68:2201-208.
- Adderley, W.P., Simpson, I.A., Davidson, D.A., 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*. 108: 181–195.
- Arunachalam A, Maithani K, Pandey H N and Tripathi R. S. 1996. The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a Pinus kesiya forest in north-east India. *Forest Ecology and Management*. 88, 273–282.
- Aydemir, S., Keskin, S., Drees, L.R., 2004. Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques. *Geoderma*. 119: 1–8.
- Barrera-Bassols, N. and Zinck, J.A. 2000. Ethnopedology in a worldwide perspective. An annotated bibliography. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Netherlands.
- Berg B., Johansson M.B., Meentemeyer V., Kratz W. 1998. Decomposition of tree root litter in a climatic transect of coniferous forests in northern Europe: a synthesis. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 13:402-212
- Bingham I.J. A.D.M. Glass, H.J. Kronzucker, D. Robinson and C.M. Scrimgeour. 2000. Isotope techniques. In: Root methods. A handbook. Smit, A.L., Bengough, A.G., Engels, C., Noordwijk, M. van, Pellerin, S., Geijn, S.C. van de (Eds.). Springer Verlag. pp 365-402.
- Bloomfield J., Vogt K.A., Wargo P.M. 1996. Tree root turnover and senescence. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. (eds) Plant roots: the hidden half, 2nd ed. Dekker, New York, pp 363-381.
- Boot, R.G.A. 1990. The significance of size and morphology of root systems for nutrient acquisition and competition. In: Lambers H., Cambridge M.L., Konings H., Pons T.L. (eds) Causes and consequences of variation in growth rate and productivity of higher plants. SPB, The Hague, pp 299–311.
- Carpentier, F., Vandermeulen, B., 2016. High-Resolution Photography for Soil Micromorphology Slide Documentation. *Geoarchaeology*. 31, 603–607.
- Cheng, W. 1999. Rhizosphere feedbacks in elevated CO₂. *Tree Physiology*. 19:313–320.
- Cheng, W., A. Gershenson. 2007. Carbon fluxes in the rhizosphere. In: Cardon, Z.G., J.L. Whitbeck (eds.) The Rhizosphere - An Ecological Perspective. 31-56. Academic Press, San Diego, CA.
- Cromack K., Sollins P., Graustein W.C., Speidel K., Todd A.W., Spycher G., Li C.Y., Todd R.L. 1979. Calcium oxalate accumulation and soil weather in mats of hypogeous fungus *Hysterangium crassum*. *Soil Biology and Biochemistry*. 11:463-468.
- Dasog, G. S. and Shashidhara G. B. 1993. Measurements of cracking intensity in a Vertisol under different crop cover. *Soil Science*. 156: 424–428.
- de Graaff, M.A., Six, J., Jastrow, J.D., Schadt, C.W., Wullschleger, S.D., 2013. Variation in root architecture among switchgrass cultivars impacts root decomposition rates. *Soil Biology and Biochemistry*. 58: 198–206.
- Dialla, B. E. 1993. The Mossi indigenous soil classification in Burkina Faso. *Indigenous Knowledge and Development Monitor*. 1 (3): 17-18.
- Dodd, M.; Mackay, A. 2011. Effects of contrasting soil fertility on root mass, root growth, root decomposition and soil carbon under a New Zealand perennial ryegrass/white clover pasture. *Plant and Soil*. 349: 291-302.
- Escalón, C.L. 1992. La clasificación campesina de tierras como marco de referencia para la optimización de insumos y prácticas de conservación en el municipio de Veracruz. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México.
- Gargiulo, L., Mele, G., Terribile, F., 2013. Geoderma Image analysis and soil micromorphology applied to study physical mechanisms of soil pore development : An experiment using iron oxides and calcium carbonate. *Geoderma*. 197–198: 151–160. }
- Gibson, Ch., 1996. Los aztecas bajo el dominio español, 1519-1810. 13a. Edición. Siglo XXI editores. México, D. F.
- Gijsman, A.J., Alarcón, H.F., Thomas, R.J., 1997. Root decomposition in tropical grasses and legumes, as affected by soil texture and season. *Soil Biol. Biochem*. 29, 1443–1450.
- Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., Vargas, T.G., Bontemps, L.C., Martínez, J.D., Méndez, E.S. & Solorio-Ortíz, C.A. 2016. Micromapping of microbial hotspots and bio films from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, 279: 11–21.

- Gutiérrez-Castorena, M. C., Ortiz-Solorio, C. A., Fernández Galán, B. E., Gutiérrez-Castorena, E. V. y González Vargas, T. 2017. Los suelos del área de influencia del Códice Santa María Asunción y su representación pictórica. *Terra Latinoamericana*. 35: 101-111.
- Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V. González-Vargas, T., Solorio-Ortíz, C.A., Suástegui Méndez, E.S, Cajuste Bontemps, L., Rodríguez Mendoza, M.N. 2018. Thematic micro-maps of soil components using high-resolution mosaics from whole soil thin sections and image analysis. *European Journal of Soil Science*. In press.
- Habarurema, E., Steiner, K.G., 1997. Soil suitability classification by farmers in southern Rwanda. *Geoderma*. 79: 75-87.
- Heal O.W., Anderson J.M., Swift M.J. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: Cadisch G, Giller KE (eds) *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, pp 3–30.
- Hendrick R.L., Pregitzer K.S. 1997. The relationship between one root demography and the soil environment in northern hardwood forests. *Ecoscience*. 4: 99-105.
- Herrera, J.M., Büchi, L., Rubio, G., Torres-Guerrero, C.A., Wendling M., Stamp, P., Pellet, D. 2017 Root decomposition at high and low N supply throughout a crop rotation. *European Journal of Agronomy*. 84: 105-112.
- INEGI 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo de Población y vivienda 2010. Consultado en octubre de 2017. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2014. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2014. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Joslin J.D., Wolfe M.H., Hanson P.J. 2000. Effects of altered water regimes on forest root systems. *New Phytologist*. 147: 117-129.
- King J. S., Pregitzer K. S., Zak D. R. (1999). Clonal variation in above- and below-ground growth responses of *Populus tremuloides* Michaux: influence of soil warming and nutrient availability. *Plant Soil*. 217: 119–130.
- Krasilnikov, P. V. 2002. Soil Terminology and Correlation (2nd edition) Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. Translation of Soil Classification of Russia. 1997. Soil Science Institute Moscow, Russia. pp. 236. (Russian).
- Lamboursain, L., St-Onge, F., Jolicoeur, M., 2002. A lab-built respirometer for plant and animal cell culture. *Biotechnol Prog*. 18: 1377–1386.
- Lawas, M.C., Luning, H.A., 1997. Capturing resource user's knowledge in a geographic information system for land resource management. *Geographical Studies of Development and Resource Use*. 2: 27.
- Li, Q., Wu, Y., Chen, W., Jin, R., Kong, F., Ke, Y., Yuan, J. 2017. Cultivar Differences in Root Nitrogen Uptake Ability of Maize Hybrids. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1060.
- Licona-Vargas, A.L., Ortiz-Solorio, C.A. Gutiérrez-Castorena, M.C., Manzo-Ramos, F. 2006. Clasificación local de tierras y tecnología del policultivo café-plátano para velillo-sombra en comunidades cafetaleras. *Terra Latinoamericana*. 24: 1-7.
- Luna, P., Ortiz-Solorio, C.A., Pajaro-Huertas, D. 1988. Clasificación campesina de suelos en dos comunidades del valle de México. *Agrociencia*. 73.
- Maragos P., Sofou A., Stamou G.B., Tzouvaras V., Papatheodorou E., and Stamou G.B., 2004. Image Analysis of Soil Micromorphology : Feature Extraction , Segmentation , and Quality Inference. *Journal on Applied Signal Processing*. 6: 902–912.
- Martínez, E., Fuentes, J., Silva, P., Valle, S., & Acevedo, E. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*. 99: 232–244.
- McLaughlin S.B., Wimmer R. 1999. Tansley review no. 104. Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytologist*. 142:373.417.
- Mu, X., Zhao, Y., Liu, K., Ji, B., Guo, H., Xue, Z. Li, C. 2016. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat–maize cropping system on the North China Plain. *European Journal of Agronomy*. 78: 32-43.
- Mun H.T., Whitford W.G. 1998. Changes in mass and chemistry of plant roots during the long-term decomposition on a Chihuahuan desert watershed. *Biology and Fertility Soils*. 26:16-22.
- Nepstad D.C., Carvalho C.R. de, Davidson E.A., Jipp P.H., Lefebvre P.A., Negreiros G.H., Silva E.D. da, Stone T.A., Trumbore S.E., Vieira S. 1994. The role of deep roots in the carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*. 372:666-669.
- Ortiz-Solorio., C. A. y M. C. Gutiérrez Castorena. 1999. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Ortiz-Solorio, C. A. y M. C. Gutiérrez-Castorena. 2001. La Etnoedafología en México: Una Visión Retrospectiva. *Revista Etnobiología*. 1: 44-62.

- Ortiz-Solorio, C. A., Gutierrez-Castorena, M. D., LiconaVargas, A. L. and Sanchez-Guzman. P. 2005. Contemporary influence of indigenous soil (land) classification in Mexico. *Eurasian Soil Sci.* 38: S89-S94, Suppl. 1.
- Osunade, 1988, Osunade A.M.A., Soil suitability classification by small farmers. *Professional Geographer.* 40: 194 – 201.
- Padilla, F.M., Peña-Fleitas, M.T., Fernández, M.D., del Moral, F., Thompson, R.B., Gallardo, M. 2017. Responses of soil properties, crop yield and root growth to improved irrigation and N fertilization, soil tillage and compost addition in a pepper crop. *Scientia Horticulturae.* 225: 422-430.
- Perkons U., Kautz, T., Uteau, D., Peth, S., Geier, V., Thomas, K., Holz, K.L., Athmann, M., Pude, R., Köpke, U. 2014. Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. *Soil and Tillage Research.* 137: 50-57.
- Phillips, D.L., Johnson, M.G., David, T., Biggart, C., Nowak, R.S., Newsom, J.O.N.C., 2000. Minirhizotron installation in sandy, rocky soils with minimal soil disturbance. *Soil Science Society American Journal.* 64: 761-764.
- Porterfield, D.M. 2002. Use of microsensors for studying the physiological activity of plant roots. In *Plant Roots: The Hidden Half*, ed. Y Waisel, A Eshel, U Kafkafi, 3rd edn., pp. 333– 347. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Post, W.M., T.H. Peng, W.R. Emmanuel, A.W. King, V.H. Dale, and D.L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *American Scientist.* 78:310–326.
- Protz, R., Sweeney, S.J., Fox, C.A., 1992. An application of spectral image analysis to soil micromorphology, 1. methods of analysis. *Geoderma.* 53: 275–287.
- Protz, R., VandenBygaart, A.J., 1998. Towards systematic image analysis in the study of soil micromorphology. *Sciences of Soils.* 3: 34–44.
- Prudencio, C.Y. 1993. Ring management of soils and crops in the West African semi-arid tropics: The case of the Mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and Environment-*. 47: 237-264.
- Pregitzer K.S., Hendrick R.L., Fogel R. 1993. The demography of one roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytologist.* 125: 575-580.
- Sahagún, Fray Bernardino de, 1907. Historia de las cosas de la Nueva España. Códice Florentino. Editado por Francisco del Paso y Troncoso. Madrid: Hauser y Menet.
- Sánchez G., P., C. A. Ortiz S., M. C. Gutiérrez C., y J. D. Gómez D. 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra Latinoamericana.* 20: 359-369.
- Sariyildiz T (2015) Effects of tree species and topography on fine and small root decomposition rates of three common tree species (*Alnus glutinosa*, *Picea orientalis* and *Pinus sylvestris*) in Turkey. *Forest Ecology and Management.* 335:71–86.
- Sauzet, O., Cammas, C., Marc, J., Bajard, M., Montagne, D., 2017. Geoderma Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections. *Geoderma.* 292: 135–148. Skjemstad, J. O., and Dalal, R. C. 1987. Spectroscopic and chemical differences in organic matter of two Vertisols subjected to long periods of cultivation. *Australian Journal of Soil Research.* 25, 323-335.
- Silver, W.L., Miya, R.K., 2001. Global patterns in root decomposition : comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia.* 129: 407–419.
- Silver W.L., Neff J., McGroddy M., Veldkamp E., Keller M., Cosme R. 2000. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. *Ecosystems.* 3:193-209.
- Silver, W.L., Vogt, K.A., 1993. Fine Root Dynamics Following Single and Multiple Disturbances in a Subtropical Wet Forest Ecosystem Author(s): Whendee L. Silver and Kristiina A Fine root dynamics following single and multiple disturbances in a subtropical wet forest ecosystem. *J. Ecol. J. Ecol. J. Ecol.* 81, 729–738.
- Soil Survey Staff. 1960. “Soil Classification, A Comprehensive System, 7th Approximation.” USDA, Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 1994. “Keys to Soil Taxonomy,” sixth ed. USDA-SCS, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. US Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Steingrobe, B., H. Schmid, R. Gutser and N. Claassen. 2001. Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems. *Biology and Fertility Soils.* 33:331-339.
- Talawar, S., Rhoades, R.E., 1998. Scientific and local classification and management of soils. *Agriculture and Human Values.* 15: 3 – 14.
- Terribile, F., FitzPatrick, E.A., 1992. The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections. *Geoderma.* 55: 159–174.
- Terribile, F., Fitzpatrick, E.A., 1995. The application of some image- analysis techniques to recognition of soil micromorphological features. *European Journal of Soil Science.* 46: 29–45.

- Toledo, V.M. 2000. Indigenous Knowledge on soils: an ethnoecological conceptualization. *In*. Barrera-Bassols, N. and Zinck, J.A. 2000. Ethnopedology in a worldwide perspective. An annotated bibliography. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Netherlands.
- Torres-Guerrero, C.A., Etchevers, J.D., Fuentes-Ponce M.H., Govaerts, B., León-González, F., Herrera, J. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31(1): 71-84.
- Vandenbygaart, A.J., Protz, R., 1999. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma*. 89: 333–346.
- Van Noordwijk M, Brouwer G, Koning H, Meijboom FW, Grzebisz W (1994) Production and decay of structural root material of winter wheat and sugar beet in conventional and integrated cropping systems. *Agricultural Ecosystems and Environment*. 51:99–113
- von Haden AC, Dornbush ME (2014) Patterns of root decomposition in response to soil moisture best explain high soil organic carbon heterogeneity within a mesic, restored prairie. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 185: 188–196.
- Whipps, J.M. 1990. Carbon Economy. *In*: Lynch, J.M. (ed.). *The Rhizosphere*. John Wiley & Sons, New York.
- Williams, B. J. and C. A. Ortiz, 1981. Middle american folk soil taxonomy. *Annals Association of American Geographers*. 71(3): 335-358.
- Zak, D.R., and K.S. Pregitzer. 1998. Integration of ecophysiological and biogeochemical approaches to ecosystem dynamics. *In*: Groffman, P.M. (ed.) *Successes, Limitations, and Frontiers in Ecosystem Science*. Springer, New York, USA, pp. 372–403.

CAPÍTULO II

DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES DE MAÍZ (*Zea Mays* L.) EN DIFERENTES CLASES DE TIERRA

DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN DIFERENTES CLASES DE TIERRA

ROOT DECOMPOSITION OF MAIZE (*Zea mays* L.) IN DIFFERENT LAND CLASSES

Carlos Alberto **Torres-Guerrero**¹, Ma. del Carmen **Gutiérrez-Castorena**^{1†}, Carlos Alberto **Ortiz-Solorio**¹,
Juan Manuel **Herrera**², Edgar V. **Gutiérrez-Castorena**³, Jorge D. **Etchevers**¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

² Agroscope, Route de Duillier 50, 1260 Nyon, Switzerland

³ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero s/n, Hacienda El Canada. 66050 Gral. Escobedo, N. L., México.

† Autor de correspondencia

RESUMEN

Los estudios sobre la descomposición de las raíces en agrosistemas, realizados en sitios experimentales y superficies pequeñas, limitan la comprensión de este proceso a nivel regional. En contraste, el conocimiento tradicional campesino proporciona información detallada y útil para conocer los tipos de suelos y manejo agronómico de extensiones grandes de terreno. La mezcla de conocimientos local y técnico constituyen el principal objetivo de la presente investigación para determinar la tasa de descomposición de las raíces < 2 mm (finas) de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes manejos agronómicos. El estudio se llevó a cabo en el ejido Vega de Madero, Hidalgo, México. Para evaluar la tasa de descomposición de raíces se realizaron entrevistas a productores locales, recorridos de campo, selección de parcelas y recolección de muestras alteradas. En el laboratorio se determinaron las propiedades edáficas y se clasificaron los suelos científicamente. El diseño experimental fue completamente al azar, donde los tratamientos fueron tres clases de tierras irrigadas, con monocultivo o rotación. Los datos se analizaron con ANDEVA y prueba de Tukey para comparar medias. En el área de estudio ocurren Vertisols e Inceptisols (Soil Taxonomy) o Vertisols y Regosols (WRB) de acuerdo con el espesor del horizonte vértico. Los productores reconocieron tres clases de tierras: Barro Negro (BN), Barro Pardo (BP) y Barro con Tepetate Blanco (BB), y tres velocidades de descomposición de la raíz: muy lenta, lenta y rápida. En riego y rotación de cultivos en BN, la descomposición fue rápida, con la tasa mayor de mortalidad relativa (0.047); mientras que en BP (0.011) y BB (0.024) las tasas correspondieron a la descomposición lenta. En condiciones de secano en BP se registró descomposición muy lenta. La interacción entre el conocimiento local y técnico de suelo fue útil para ubicar geográficamente velocidades y determinar tasas de descomposición de raíces con diferente manejo agronómico.

Palabras clave: *Conocimiento local, densidad radical, manejo agronómico, tasa de descomposición relativa, entrada de carbono, Zea mays.*

INTRODUCCIÓN

La descomposición de las raíces se considera un proceso fundamental para el desarrollo de las plantas y su interacción con el suelo, al regular la transferencia de C y afectar al ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Bloomfield *et al.*, 1996); además, representa un flujo abundante de CO₂ hacia la atmosfera (Canadell *et al.*, 2007).

En general, la descomposición de las raíces se afecta por su composición química (contenido de lignina), temperatura media anual de la zona donde crece la planta y el contenido de humedad del suelo (Gill y Jackson, 2000; Silver y Miya, 2001; Zhang y Wang, 2015). Otros factores como el manejo agronómico (van Noordwijk *et al.*, 1994; Linh, *et al.*, 2015), el riego (Arroita *et al.*, 2013) y el grosor de las raíces también son importantes.

Cuando el manejo agronómico se basa en monocultivos, ocurre una reducción y limitación significativa del crecimiento de los sistemas radicales por compactación; en contraste con la rotación de cultivos, donde las raíces encuentran una mejor estructura para desarrollarse (Linh *et al.*, 2015; Mu *et al.*, 2016). Por su parte, el riego modifica la distribución espacial y temporal, la densidad y capacidad de penetración de las raíces (Wang *et al.* 2014; Xu *et al.*, 2016) y la disponibilidad de los nutrientes del suelo (Seiffert *et al.*, 1995).

Investigaciones recientes indican que el grosor de las raíces (finas < 2 mm y gruesas > 2 mm) responde de manera diferencial a los procesos de descomposición (Zhang y Wang, 2015). Las raíces finas por su mayor número representan un mayor costo de C para las plantas con respecto a las gruesas (Yuan y Chen 2010) y pueden fungir como sumidero de C en agrosistemas (Zhang y Wang, 2015). Sin embargo, a pesar de existir un conocimiento abundante sobre este proceso, las investigaciones se han desarrollado en lotes o parcelas experimentales (Silver y Miya, 2001; Zhang y Wang, 2015), y los resultados son extrapolados incluso hasta escalas pequeñas (Gill y Jackson, 2000), por lo cual no se tiene información regional de todo el proceso de descomposición de raíces.

Si se planteara generar información espacial a nivel regional a través del levantamiento de suelos detallado, los costos y el tiempo requerido se elevarían de manera considerable, lo que restringiría su factibilidad, sobre todo en países en desarrollo. En ese sentido, la clasificación campesina de tierras ha sido útil para relacionar las practicas agronómicas, la fertilidad del suelo (Osunade, 1988), el potencial productivo de cultivos (Habarurema y Steiner, 1997), y la incorporación de enmiendas orgánicas y rotación de cultivos (Prudencio, 1992; Reséndiz-Paz

et al., 2013). Además, se ha realizado cartografía de clases de tierras para regionalizar producción y técnicas de laboreo en zonas de cultivo (Sánchez-Guzmán *et al.*, 2002; Licona *et al.*, 2006). Por lo que, la hipótesis del estudio es que la interacción de conocimientos local de tierras y técnico de suelos puede ubicar, representar y cuantificar las tasas de producción y descomposición de las raíces a nivel regional.

El objetivo de la presente investigación fue generar información y mapas regionales de la tasa de descomposición de las raíces en diferentes manejos agronómicos a través de la integración del conocimiento local de tierras y técnico de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El ejido Vega de Madero (556 Ha) se localiza en el municipio de Tepeji del Rio, al suroeste del estado de Hidalgo, México ($19^{\circ}58'$ - $19^{\circ}59'$ N y $99^{\circ}25'$ - $99^{\circ}27'$ O; Figura 1). Pertenece a la región fisiográfica denominada Eje Volcánico Transmexicano, donde los materiales parentales dominantes son rocas extrusivas y piroclásticas (Krasilnikov *et al.*, 2013). En la zona se reporta un clima templado semi-húmedo con lluvias en verano; humedad residual del suelo de ocho meses con una precipitación total anual promedio de 892 mm y una temperatura media anual de 12 °C. Los suelos predominantes son Phaeozems y Vertisols los cuales se distribuyen de Oeste a Este. La vegetación de la zona es inducida y se compone de cultivos como maíz, avena y frijol (INEGI, 2015). El sistema de riego empleado para los cultivos es por inundación (surcos y melgas), abastecido por una presa derivadora que se encuentra al oeste del ejido.

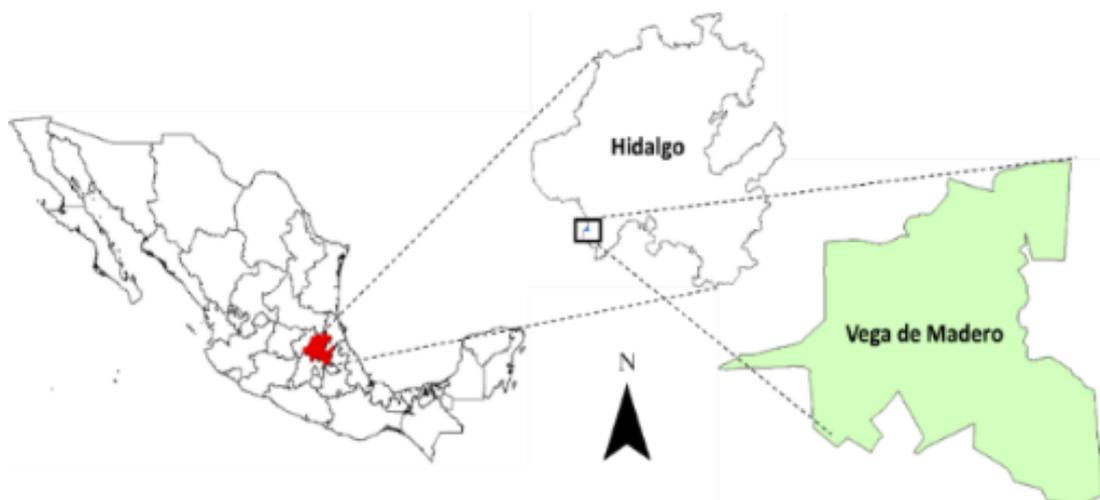


Figura 1. Localización del Ejido Vega de Madero en el territorio nacional.

Clasificación campesina de tierras y trabajo de campo

La cartografía de clases de tierras se llevó a cabo a través de recorridos en campo en compañía de los productores y utilizando un mapa base del ejido (Ortiz-Solorio *et al.*, 1990). Posteriormente, las tierras fueron delimitadas por los productores y los linderos rectificadas con ayuda del comisariado ejidal. También se llevaron a cabo entrevistas libres, espontáneas y no remuneradas a los productores, preferentemente laborando en sus parcelas, hasta que la información fuera repetitiva según la metodología propuesta por Williams y Ortiz-Solorio (1981). Los temas a preguntar fueron: 1) ¿Cuántas clases de tierras ocurren en el ejido?, 2) ¿Cómo las reconocen?, 3) ¿Cuáles son las parcelas representativas en cada clase de tierra y su manejo agronómico (riego, cultivo, y fertilización) ?, 4) ¿En cuál de ellas se descomponen más rápido las raíces? y 5) ¿por qué se descomponen más rápido las raíces?

En cada clase de tierra se realizaron perfiles de suelos, los cuales se describieron morfológicamente utilizando el manual de Cuanalo (1990) y se colectaron muestras de cada capa u horizonte para su posterior análisis de laboratorio.

Una vez recabada la información acerca de las clases de tierras, se procedió a seleccionar las parcelas con diferentes manejos agronómicos: con riego (r) o secano o temporal (t). En las parcelas de temporal sólo se eligieron monocultivos, ya que no realizan otras prácticas. En las tierras bajo riego, que son la mayoría en el ejido, se consideraron parcelas con: 1) monocultivo de maíz (m), y 2) rotación maíz-avena (r). El objetivo de esta selección fue llevar a cabo el ensayo sobre la producción y descomposición de raíces. En ambos casos se eligieron parcelas que tuvieran como mínimo cinco años practicando el mismo tipo de manejo.

El diseño experimental que se empleó para cuantificar la descomposición de las fue completamente aleatorio. Los tratamientos consistieron en tres clases de tierra y tres manejos agronómicos: riego+rotación, riego+monocultivo y temporal+monocultivo (solo presente en BP). Cada tratamiento conto con tres repeticiones.

En las parcelas seleccionadas se instalaron núcleos de crecimiento interno según la propuesta metodológica de Steingrobe *et al.* (2001) y fueron monitoreados durante dos ciclos de cultivo 2015 y 2016.

Cada 30 días, los núcleos se remplazaron por nuevos núcleos con suelo sin raíces y resguardados en hielo durante el muestreo en campo. Posteriormente, en el laboratorio se mantuvieron a una temperatura de 4° C hasta su análisis, para evitar la descomposición de las raíces. En ambos casos el monitoreo se realizó sólo en las plantas de maíz y comenzó a los 55 días después de la siembra (dds) y terminó a los 145 dds. En el primer ciclo de cultivo (2015), la siembra del maíz fue el 9 de mayo y los núcleos se sucedieron consecutivamente hasta el día

3 de noviembre. Para el ciclo 2016, la siembra fue retrasada por los productores hasta el 1 de junio como consecuencia de un periodo de sequía y bajas precipitaciones en la región (SMN, 2017). Los núcleos fueron muestreados hasta el 28 de noviembre de 2016.

Algunos factores desfavorables durante el estudio fueron los siguientes: en el ciclo de 2015, los productores del ejido retiraron los núcleos, por lo que sólo se obtuvieron datos en dos tratamientos en el primer muestreo (a los 55 dds) y en el ciclo 2016 sólo se instalaron cuatro de seis tratamientos, porque las parcelas de toda una clase de tierra las rentaron y cultivaron con hortalizas.

Muestras de suelo se tomaron mensualmente en cada parcela experimental con una barrena espiralada para medir el contenido de humedad gravimétrico (Van Reeuwijk, 2003) y relacionarlo con la descomposición de las raíces.

Análisis de laboratorio

Propiedades edáficas y clasificación taxonómica

Las muestras de suelo de cada horizonte fueron secadas al aire a la sombra, y luego se tamizaron a 2 mm para obtener la fracción de tierra fina. Los análisis físicos y químicos realizados fueron textura (método de la pipeta), carbón orgánico (Walkley & Black), CIC (Acetato de Amonio, a pH 7), densidad aparente (terron parafinado) y pH (2:1 agua: suelo). Todos los procedimientos fueron extraídos del Manual de Van Reeuwijk (1993). Con los datos de campo y los análisis de laboratorio se clasificaron los suelos utilizando a la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) y a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2014).

Producción y descomposición de raíces en las diferentes clases de tierras

Las raíces en cada núcleo se separaron con un tamiz de 0.5 mm, para calcular su longitud y la densidad radical (DR) con el método del intercepto de Newman (1966). Luego, se secaron en una estufa a 60 °C para cuantificar su biomasa y calcular los parámetros de productividad relativa, mortalidad relativa e índice de recambio según Steingrobe *et al.* (2001). Por su parte, la biomasa seca fue puesta en un analizador automático TOC para cuantificar el porcentaje de Carbono orgánico presente en las raíces de cada tratamiento y posteriormente se calculó el aporte de C al suelo por parte de las raíces.

Análisis de datos

Los datos promedio de todo el ciclo de cultivo fueron calculados para los parámetros radicales de biomasa, DR, mortalidad, productividad e índice de recambio; asimismo, el

porcentaje de humedad gravimétrico, el porcentaje de C presente en las raíces y el C que aportan las raíces al suelo. Para compararlos se empleó el análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía. Cuando se encontraban diferencias significativas se practicó la prueba de Tukey para detectar los tratamientos disimiles. Además, se realizaron regresiones lineales para encontrar correlaciones entre los parámetros radicales y el contenido de humedad gravimétrica del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación campesina de tierras

Tres clases de tierra fueron reconocidas por los pobladores en el área de estudio, por su superficie de mayor a menor: Barro Negro (BN), Barro Pardo (BP) y Barro con Tepetate Blanco (BB) (Figura 2).

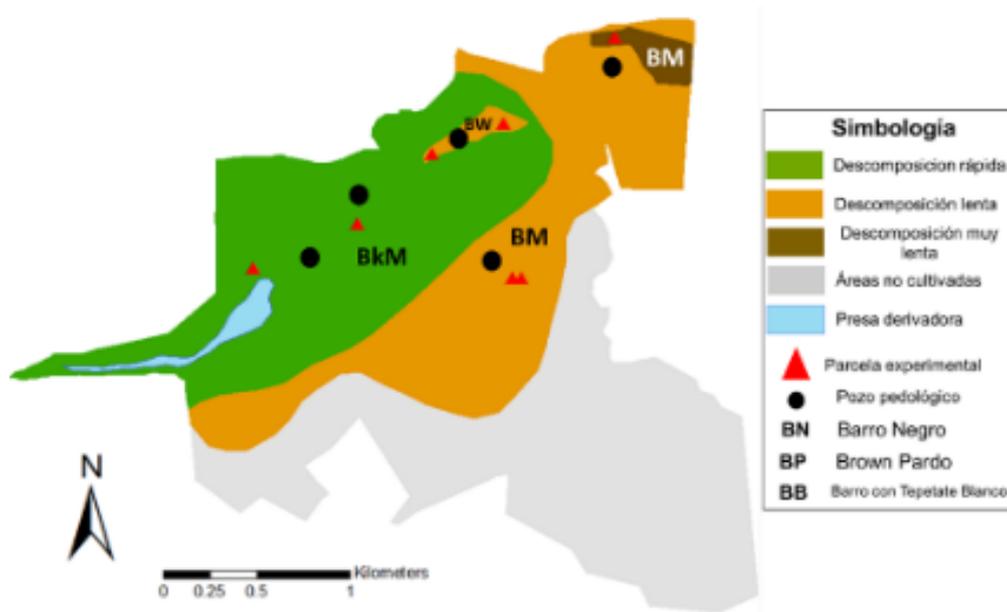


Figura 2. Mapa de la velocidad de descomposición de raíces y las diferentes clases de tierra según los productores. Además, se muestra la ubicación de los pozos edafológicos y parcelas experimentales en el ejido Vega de Madero, Hidalgo.

En general, los productores clasifican a las clases de tierras con base en su color, profundidad, almacenamiento de humedad y tiempo invertido en laborear (Cuadro 1). En cuanto a la calidad de las clases de tierras los productores la establecen en términos de productividad, color, cantidad de barro, profundidad, grietas y presencia de capas endurecidas. Las tierras con mayor fertilidad son oscuras, pegajosas, con pocas grietas y profundas (BN); mientras que las de menor calidad son claras, poco pegajosas, someras, con grietas causadas por la poca cantidad de humedad y presencia de un horizonte endurecido (BP y BB).

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con las características descritas por los productores en las diferentes clases de tierras del ejido Vega de Madero, Hidalgo.

Propiedad	Clase de tierra		
	Barro Pardo	Barro con Tepetate Blanco	Barro Negro
Consistencia en seco	Terrones duros	Terrones duros	Terrones muy duros
Consistencia en húmedo	Chiclosa	Arenosa	Muy chiclosa
Grietas en seco	< 5 cm	< 2 cm	> 5 cm
Retención de humedad	Guarda humedad	Guarda poca humedad	Guarda mucha humedad
Laboreo	Apretado si no hay agua	Más fácil de trabajar con maquinaria, aunque no haya humedad	Muy apretado si no hay agua
Fertilidad	Necesita mucho fertilizante	Necesita mucho fertilizante	Necesita poco fertilizante
Calidad			
• Color	Pardo o café	Pardo claro	Negro
• Barro	Mucho	Poco	Mucho
• Profundidad (cm)	30-40	25-30	25-50
• Capas endurecidas	Tepetate	Tepetate	Sin tepetate Presencia de rocas (> 30 cm)
Productividad	Poco productiva	Medianamente productiva	Muy productiva

En las tres clases de tierras, la preparación para la siembra en las parcelas es la misma en todos los casos (barbecho, rastreo y nivelación), pero varía en cuanto al número de veces que pasa la maquinaria por las parcelas. Para BN y BB el trabajo de preparación de terreno es menor que para BP, donde la maquinaria suele pasar dos veces.

La fertilización se hace con sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄) y difieren las cantidades que se adicionan a cada clase de tierra, siendo BN la que menos fertilizante necesita. En todas las clases de tierras las parcelas son irrigadas, excepto en BP la cual contiene parcelas de temporal. Las enmiendas orgánicas son aplicadas de forma periódica en BN y BB, una vez por año y de manera esporádica en BP en lapsos de entre tres y cinco años. Por último, los cultivos empleados son maíz en monocultivo con un ciclo anual o rotación maíz-avena con ciclo alternado maíz en primavera y avena en invierno cada año (Cuadro 2).

Cuadro 2. Prácticas agronómicas y la percepción de la descomposición de las raíces en el ejido Vega de Madero, Hidalgo según los productores.

Manejo	Clase de Tierra			
	Barro Pardo		Barro con Tepetate Blanco	Barro Negro
Fertilización con Sulfato de Amonio (kg ha ⁻¹)	120-140		100	80
Aplicación de Enmiendas orgánicas	3 o 5 años		Cada año	Cada año
Condición Hídrica	Secano	Riego	Riego	Riego
Cultivo	Monocultivo	Monocultivo y Rotación	Monocultivo y Rotación	Monocultivo y Rotación
Descomposición de raíces	Muy lenta	Lenta	Lenta	Rápida

Los resultados de los análisis de campo y laboratorio (Cuadro 3) se utilizaron para obtener la clasificación de los suelos según Soil Survey Staff (2014) y IUSS Working Group WRB (2014).

Los suelos son arcillosos con contenidos de arcilla de 50-70% (BN y BP) o bien franco-arcillosos con 22-30% de arcilla (BB). Las densidades aparentes (Dap) son altas en la superficie (> 1.5 g cm⁻³); aunque pueden ocurrir valores más bajos (1.34 gcm⁻³) cuando se incrementa el contenido de arena. En BB es donde los productores reconocen el menor contenido de barro. Los colores negros se presentaron en BN tanto en seco como en húmedo (10YR3/1 y 10YR2/1) y fueron los más oscuros como lo mencionaron los productores, seguido de BP gris olivo oscuro en seco y negro en húmedo (10YR3/2 y 10YR2/1). Los colores más claros se observaron en BB de gris oscuro en seco a gris muy oscuro cuando húmedo (10YR4/1 y 10YR3/1).

Propiedades edáficas y clasificación taxonómica del suelo

En las clases BP y BB se registró una estructura muy desarrollada de bloques subangulares de tamaño muy grande (hasta 10 cm de longitud) y grietas (2-5 cm de grosor) en el suelo. En el caso de BN, el desarrollo estructural y grosor de las grietas se van modificando conforme se acercan a la presa. Los bloques subangulares son de 0.5-2.5 cm y grietas < 2cm en el perfil más alejado y en el más cercano, el tamaño disminuye de 0.5-1.0 cm y sin evidencia de grietas (Figura 3).

Cuadro 3. Propiedades edáficas y clasificación de suelos de las diferentes clases de tierra.

Horizonte	Prof. (cm)	Clase Textural	Color (10YR)		Dap (gcm ⁻³)	BS (cm)	R (%)	MO (%)	CIC (Cmol kg ⁻¹)	pH
			Seco	Húmedo						
<i>Barro Pardo</i>										
Typic Dystrustepts (USDA) Regosol (Leptic-clayic) (WRB)										
Ap	0-8	Arcilla			1.65		60	0.97	35	6.8
Ap2	8-26	Arcilla			1.59		60	1.29	35	6.8
Bw	26-33	Arcilla	3/2	2/1	1.78		51	1.29	36	7.2
2Cr	33-45	Franco-Arcilloso			1.66		34	0.51	44	7.5
						0.5-10				
Ap	0-13	Arcilla			1.79		59	6.82	35	6.5
Bw	13-35	Arcilla	3/2	2/1	1.88		61	1.03	22	7.1
2Cr	35-53	Arcilla			1.78		42	0.64	55	7.5
<i>Barro con tepetate blanco</i>										
Typic Dystrustepts (USDA) Regosol (Leptic-clayic) (WRB)										
Ap	0-13	Franco-Arcilloso			1.34		30	1.22	19	7.7
Ap2/C	13-25	Franco-Arcilloso	4/1	3/1	1.43	0.5-10	39	1.16	34	7.6
Cr	25-35	Franco-Arcillo-Arenoso			1.55		22	0.45	25	7.7
<i>Barro Negro</i>										
Udic Haplausterts (USDA) Vertisol (Leptic-skeletal) (WRB)										
Ap	0-15	Arcilla			1.52		57	4.25	19	6.2
B _{ss}	15-40	Arcilla	2/1	2/1	1.63	0.5-2.5	60	1.54	31	7.0
B/C	40-55	Arcilla			1.54		66	0.58	39	7.7
<i>Barro Negro</i>										
Vertic Haplaustepts (USDA) Regosol (Leptic-protovetric) (WRB)										
Ap	0-15	Arcilla	3/1	2/1	1.64	0.5-1.0	51	3.41	33	5.9
B _{ss}	15-30	Arcilla			1.43		70	2.70	86	5.9

Prof: Profundidad; R: Arcillas; MO: Materia Orgánica; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; Dap: Densidad aparente; BS: Bloques subangulares.

Las mayores acumulaciones superficiales de materia orgánica (MOS) se presentan en BN (3.41-4.25%) y las menores en BP y BB (0.97-1.22%). Sin embargo, se debe indicar que la adición de enmiendas orgánicas dos semanas antes de la excavación del perfil en BP incrementó el contenido de MO (6.82%), en el horizonte superficial.



Figura 3. Estructura del suelo: a) Tierra Barro Pardo; b) Barro con Tepetate Blanco; y c) Barro Negro.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es variable en BP y BN (30-85 Cmol kg⁻¹); mientras que en BB <35 Cmol kg⁻¹, por el menor contenido de arcilla y MO. Por su parte, los valores de pH se localizaron dentro de los neutros (7.7) y hacia los ligeramente ácidos (5.9).

En los perfiles de suelo se observaron horizontes endurecidos (tepetate) en BP y BB como se mencionó en la clasificación campesina de tierras (Figura 4). Estas capas están formadas por tobas volcánicas cristalíticas de riolita. Además, se registraron horizontes cámbicos (Bw) para BP con un incipiente proceso de vertizolitización. En el caso de BN, los productores mencionaron la existencia de tepetates, pero los horizontes endurecidos que se observaron fueron contactos líticos de fragmentos de basalto (>70 cm). En ambos perfiles se reconocieron caras de deslizamiento, aunque de mayor magnitud (3 cm) en el perfil más distante a la presa.

Según el IUSS Working Group WRB (2014), los suelos que se presentan en la zona de estudio son Regosols y Vertisols. Los Regosols, dentro de las tierras de BP y BB, poseen los mismos calificadores (leptic-clayic) por su profundidad y contenido de arcilla; mientras que, en BN los calificadores son leptic-protovetric, por la presencia de caras de deslizamiento. Los Vertisols ocurren cuando el espesor del suelo con propiedades vérticas se incrementa y la presencia de rocas (< 50 cm de profundidad) y un estrato endurecido (< 100 cm de profundidad) determinan a los calificadores leptic-skeletal.

De acuerdo con el Soil Survey Staff (2014), en el área se presentan dos órdenes: Inceptisols y Vertisols, donde el régimen de humedad, la CIC y espesor del horizonte con propiedades vérticas (agregados cuneiformes y caras de deslizamiento) determinan su clasificación. Los Typic Dystrustepts son comunes en BP y BB; en tanto que los Vertic Haplaustepts y Udic Haplausterts se presentan en BN, donde el proceso de vertizolitización y el régimen de humedad del suelo establecieron la clasificación. De hecho, la cercanía de los suelos con la presa establece el régimen údico de los Vertisols.

El conocimiento local de tierras es más detallado a nivel superficial e integral, ya que incorpora conceptos que no son propiamente edáficos para determinar las clases de tierra presentes, su calidad y productividad; mientras que, con las clasificaciones técnicas (Soil Taxonomy y la Base Referencial Mundial del Suelo) se obtiene mayor información a nivel vertical y otras características edáficas. Estas aparentes discordancias entre conocimientos se deben a la conceptualización de la tierra (suelo) por parte de los productores locales y el técnico. Lo que en un principio pareció un concepto bidimensional para el conocimiento local (Williams y Ortiz-Solorio, 1981), se demostró en trabajos posteriores que ambos conceptos incorporan tres dimensiones, pero el conocimiento local da mayor importancia a la capa superficial (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001).

Barro Pardo
Typic Dystrustepts Regosol (Leptic-clayic)



Barro con Tepetate Blanco
Typic Dystrustepts Regosol (Leptic-clayic)



Barro Negro
Vertic Haplaustepts Regosol (Leptic-protovertic)



Barro Negro
Udic Haplausterts Vertisol (Leptic-skeletal)



Figura 4. Perfiles de suelos y su asociación con el paisaje de las diferentes clases de tierras.

Las investigaciones que conjuntan ambos conocimientos (sin que ninguno pierda sus propiedades) ha generado un puente de comunicación entre técnicos y productores, que resulta conveniente al momento de generar información cartográfica detallada y más precisa que la de fuentes oficiales como INEGI (Lleverino *et al.*, 2000). Al mismo tiempo, ha permitido el conocimiento detallado en tipos de cultivos, labores de cultivo, abonos, arvenses y manejo y recuperación de tierras (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001). Además, se puede hacer transferencia de tecnología adaptada a regiones específicas (Licona *et al.*, 2006), uso de implementos agrícolas y desarrollo de estrategias para sistemas de producción (Sánchez-Guzmán *et al.*, 2002).

Descomposición de raíces en las diferentes clases de tierras

Los productores identifican tres velocidades de descomposición de acuerdo con la presencia de raíces finas y gruesas, entre el periodo de cosecha y preparación del siguiente ciclo:

- 1) Muy lenta; abundantes raíces finas y gruesas;
- 2) Lenta; comunes raíces finas y gruesas; y
- 3) Rápida; comunes raíces finas y muy pocas raíces gruesas.

Con base en esta clasificación, las tierras BN tienen una descomposición rápida y las clases BB y BP presentan una descomposición lenta (Figura 2). Sin embargo, los productores también indican que la condición hídrica del cultivo afecta la velocidad de descomposición de las raíces. Al estar bajo condiciones de secano en BP se presenta la descomposición muy lenta.

Descomposición muy lenta

Bajo secano, las tierras de BP tienen la menor tasa de mortalidad radical (0.08) lo que concuerda con el conocimiento de los productores locales, que reconocen una menor descomposición cuando no hay riego en las parcelas

La condición hídrica de temporal y monocultivos de maíz en BP-t-m, presentó diferencias estadísticas para los dos ciclos de cultivo en los parámetros de biomasa (1.50 y 0.57 t ha⁻¹) y densidad radical (0.87 y 0.53 cm cm⁻³ suelo) con respecto al tratamiento con riego y monocultivo (BP-i-r) en donde los valores de biomasa (2.27 y 1.057 t ha⁻¹) y la densidad radical (1.31 y 1.21 cm cm⁻³ suelo), son dos veces más altos. Estos valores muestran que hay una menor producción y desarrollo de las raíces cuando no son irrigadas, lo que significa que el riego afecta la producción y mortalidad de las raíces en las tierras de BP. Los resultados concuerdan con las investigaciones que demostraron un aumento en la densidad (Chilundo *et al.*, 2017) y

mortalidad de las raíces de maíz cuando son irrigadas, debido a una mejor disposición de los nutrientes en el suelo (Hulugalle *et al.*, 2015).

Por otra parte, los contenidos de humedad en condiciones de secano (19 y 15 %) favorecieron los movimientos de expansión y contracción, la formación de grietas alargadas y pérdida en la continuidad de los poros que impide el crecimiento óptimo de las raíces (Coulombe *et al.*, 1996). En el caso de las parcelas de BN y BB todas cuentan con riego por lo que no fue posible comparar la condición hídrica de temporal en estas clases de tierra.

Descomposición lenta

De acuerdo con los parámetros radicales de biomasa, densidad, productividad y mortalidad relativa de las raíces obtenidos mediante los núcleos de crecimiento interno, se demostró que todos los tratamientos de BP y BB son estadísticamente similares, tanto en monocultivos como en las rotaciones (Cuadro 4). Estos resultados concuerdan con la descomposición lenta mencionada por los productores.

Este fenómeno puede ser explicado para BP a través de la Dap, donde los valores obtenidos (1.4-1.7 g cm⁻³) están por encima de los críticos (1.37 g cm⁻³) para el crecimiento temprano de las raíces de maíz en Vertisols (Wilson *et al.*, 2013), provocando que la producción y descomposición de las raíces fuera limitada. Sin embargo, en tierras de BB, la Dap superficial fue de 1.34 g cm⁻³ y no se produjeron más raíces que en BP, por lo que otros factores como los procesos de humedecimiento y secado, el contenido de MO o el contenido de arcillas expansibles ejercieron mayor influencia sobre el crecimiento y mortalidad de las raíces.

Los altos contenidos de arcillas expansibles 2:1 y los periodos en donde el contenido de humedad fue bajo (< 25 %), como ocurre en las tierras BP y BB contribuyeron a la formación de grietas y fuerte desarrollo de los agregados; en consecuencia, interrumpen el crecimiento de las raíces (Coulombe *et al.*, 1996). De hecho, la presencia de grietas conduce a procesos erosivos y a la pérdida de humedad y fertilidad por escorrentías (Inoubli *et al.*, 2016). Este proceso es magnificado cuando se emplean monocultivo (López-Bellido *et al.*, 2016).

La baja producción y mortalidad en los monocultivos en las clases de tierra BN y BB, se ve reflejada en los valores de índice de recambio y concuerda con los bajos contenidos de MO (< 1.22 %). Un caso aparte fue la clase de tierra BP en donde se registró un alto contenido de MO (6.82 %), por la adición de estiércol dos semanas antes de comenzar el experimento, pero estas adiciones no fueron suficientes para mejorar la formación de agregados y aumentar la actividad biológica del suelo (Rahman *et al.*, 2016).

Cuadro 4. Valores promedio de algunos parámetros radicales de maíz en las diferentes clases de tierra del ejido Vega de Madero, Hidalgo en los ciclos de cultivo 2015 y 2016.

Tratamiento	Riego + Monocultivo		Tratamiento	Riego + Rotación	
	2015	2016		2015	2016
	<i>Biomasa radical (t ha⁻¹)</i>			<i>Biomasa radical (t ha⁻¹)</i>	
BP-i-m	2.274a	1.057a	BP-i-r	2.003a	0.901
BB-i-m	2.510a	0.991a	BB-i-r	1.645a	
BN-i-m	2.616a		BN-i-r	9.172b	
	<i>Tasa de mortalidad relativa</i>			<i>Tasa de mortalidad relativa</i>	
BP-i-m	0.014a	0.021a	BP-i-r	0.011a	0.023
BB-i-m	0.025a	0.026a	BB-i-r	0.024a	
BN-i-m	0.010a		BN-i-r	0.047b	
	<i>Tasa de productividad relativa</i>			<i>Tasa de productividad relativa</i>	
BP-i-m	0.041a	0.036a	BP-i-r	0.035a	0.018
BB-i-m	0.043a	0.038a	BB-i-r	0.036a	
BN-i-m	0.044a		BN-i-r	0.200b	
	<i>Aporte de C (t ha⁻¹)</i>			<i>Aporte de C (t ha⁻¹)</i>	
BP-i-m	0.916a	0.426a	BP-i-r	0.803a	0.360
BB-i-m	0.996a	0.393a	BB-i-r	0.658a	
BN-i-m	0.803a		BN-i-r	4.171b	
	<i>Índice de recambio</i>			<i>Índice de recambio</i>	
BP-i-m	0.028a	0.029a	BP-i-r	0.024a	0.021
BB-i-m	0.031a	0.030a	BB-i-r	0.036a	
BN-i-m	0.027b		BN-i-r	0.128b	
	<i>Humedad (%)</i>			<i>Humedad (%)</i>	
BP-i-m	25a	19a	BP-i-r	25a	20a
BB-i-m	25a	15a	BB-i-r	26a	20a
BN-i-m	28a	28b	BN-i-r	32b	31b

Columnas con letras diferentes muestran diferencias estadísticas entre tratamientos. BP: Barro pardo, BB: Barro con tepetate blanco, BN: Barro negro.

Descomposición rápida

La descomposición rápida de las raíces, como lo comentaron los productores, es el resultado de una mayor disponibilidad de humedad por su cercanía a la presa, infraestructura de canales de riego y accesibilidad de maquinaria. Además, de la adición con mayor frecuencia (una vez por año) de estiércoles o enmiendas orgánicas. Sin embargo, esto solo ocurre cuando se lleva a cabo la rotación de cultivos en las tierras de BN.

La baja producción y mortalidad en los monocultivos en las clases de tierra BN y BB, se ve reflejada en los valores de índice de recambio y concuerda con los bajos contenidos de MO (< 1.22 %). Un caso aparte fue la clase de tierra BP en donde se registró un alto contenido de MO (6.82 %), por la adición de estiércol dos semanas antes de comenzar el experimento, pero estas adiciones no fueron suficientes para mejorar la formación de agregados y aumentar la actividad biológica del suelo (Rahman *et al.*, 2016).

Los datos de laboratorio muestran que la descomposición rápida sólo se presenta cuando se implementa la rotación de cultivos y el contenido de humedad (> 30 %) no permite la formación de grietas. En los tratamientos con rotación de cultivos se presentaron diferencias significativas, con valores entre 2 y 6 veces mayores para la mortalidad y productividad relativa y hasta 4.5 veces más en la biomasa radical con las otras clases de tierra. En los monocultivos de las tierras BP y BB, los valores obtenidos muestran que en los suelos ocurre una descomposición de raíces lenta a pesar de contar con riego.

Cuando se analizó la descomposición mensual de las raíces, en términos de densidad radical, se encontraron diferencias significativas en rotación de cultivos durante la antesis de las plantas de maíz (55-60 dds) en ambos ciclos de cultivo, pero en no monocultivos (Figura 5). En el caso de la mortalidad también se presentó el mismo comportamiento, en donde la rotación de cultivos y la clase de tierra (BN-i-r), muestran valores que son estadísticamente diferentes en el ciclo 2015 (8.11, 6.07, 5.95 y 3.92 cm cm⁻³ suelo).

El contenido de humedad presentó diferencias significativas en BN-i-r, lo que muestra que es otro factor que está afectando los parámetros radicales, pero no se encontraron correlaciones con el índice de recambio, productividad y mortalidad de las raíces ($R^2 \leq 0.5$). En ese sentido, el contenido de humedad está afectando de manera indirecta a los parámetros radicales pues genera colapso de la estructura y afecta la aireación del suelo (Czyż, 2004).

El aumento en la producción de raíces, al rotar los cultivos, ha sido reportado por varios autores en arroz-remolacha (Linh *et al.*, 2015), trigo-remolacha (van Noordwijk *et al.*, 1994) y maíz-trigo (Mu *et al.*, 2016). Esta práctica mejora la estructura del suelo al incorporar MO de la descomposición de raíces de cultivos anteriores y expanden la zona de enraizamiento mejorando la estabilidad de los agregados y los sumideros de C orgánico (Linh *et al.*, 2015). También, al rotar los cultivos disminuye número y magnitud de grietas en Vertisols (López-Bellido *et al.*, 2016), mejora la retención de agua (Bhagat y Verma, 1991) e incrementa infiltración (Chilundo *et al.*, 2017).

Por último, el porcentaje promedio de C presente en las raíces con rotación de cultivo fue el que registró los valores mayores: 45.48 % (BN), 40.11 % (BP), 40.02 % (BB) con respecto de los monocultivos de 40.02 % (BP), 39.68 % (BB) y 30.46 % (BN). El aporte de C al suelo por las raíces en BN-i-r fue hasta 400% mayor que todos los tratamientos.

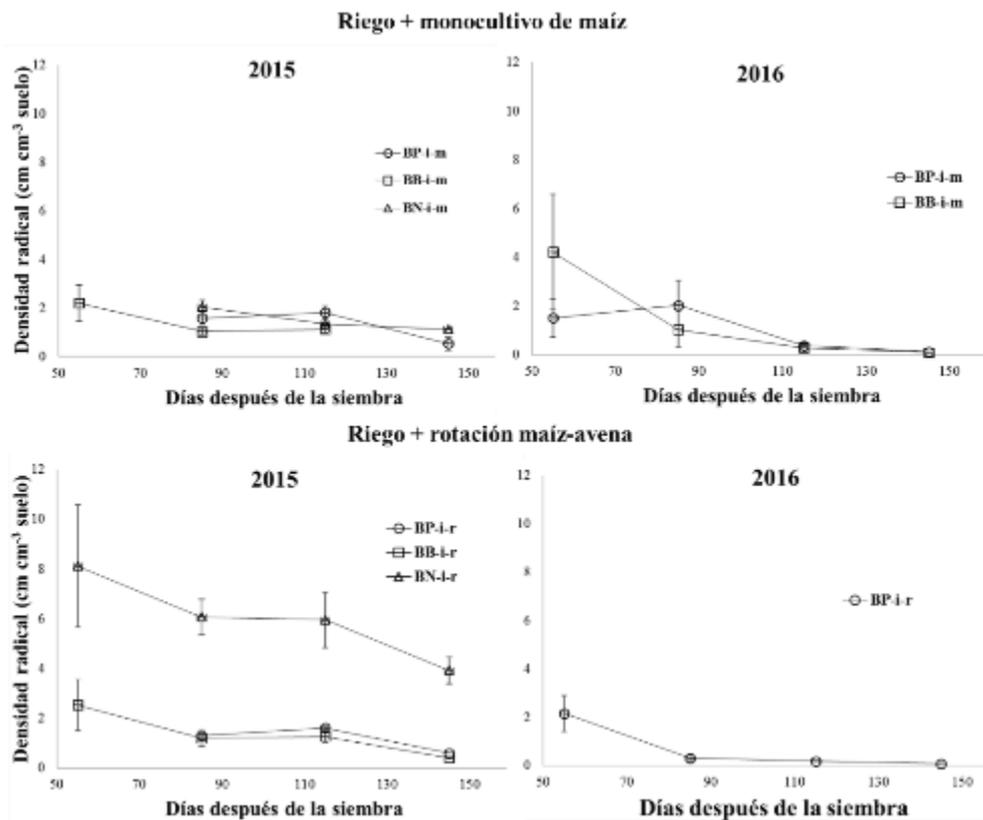


Figura 5. Longitud de las raíces de maíz en descomposición en los tratamientos instalados en los ciclos de cultivo 2015 y 2016. Letras diferentes en las gráficas indican diferencias significativas. BP: Barro Pardo, BB: Barro con Tepetate Blanco, BN: Barro Negro, i: riego, m. monocultivo y r: rotación. Líneas verticales en los puntos representan el error estándar de la media de los tratamientos.

CONCLUSIONES

El conocimiento campesino de tierras permite identificar la clase de tierra donde se lleva a cabo con mayor velocidad la descomposición de raíces y lo clasifican en tres intensidades muy lenta, lenta y rápida de acuerdo con la presencia de raíces finas y gruesas entre el periodo de cosecha y preparación del siguiente ciclo.

Con los núcleos de crecimiento interno se demostró que la rotación de cultivos y la clase de tierra son los factores que influyen de manera directa en producción y descomposición de las raíces de maíz; mientras que la humedad interviene de manera indirecta al reducir la contracción de los agregados y formación de grietas en las parcelas cercanas a la presa.

Con la interacción del conocimiento local y técnico de suelos se puede ubicar la distribución espacial de la descomposición de raíces y obtener información detallada tanto de parámetros radicales como de manejo de las parcelas de cultivo, para regionalizar la información en cartografía detallada.

LITERATURA CITADA

- Arroita, M., J. Causapé, J., Comín, F.A., Díez, J., Jimenez, J.J., Lacarta, J., Lorente, C., Merchán, D., Muñiz, S., Navarro, E., Val, J. and A. Elosegui. 2013. Irrigation agriculture affects organic matter decomposition in semi-arid terrestrial and aquatic ecosystems. *J. Hazard. Mater.* 263: 139-145.
- Bhagat, R.M., and T.S. Verma. 1991. Impact of rice straw management on soil physical properties and wheat yield. *Soil Sci.* 152: 108-115.
- Bloomfield, J., K.A. Vogt and P.M. Wargo. 1996. Tree root turnover and senescence. In: Waisel Y., A. Eshel and U. Kafkafi (eds) *Plant roots: the hidden half*, 2nd ed. Dekker, New York, 363-381.
- Canadell J.G., C.L. Quéré, M.R. Raupach, C.B. Field, E.T. Buitehuis, P. Ciais, T.J. Conway, N.P. Gillett, R.A. Houghton and G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS.* 104, 18866-18870.
- Chilundo, M., A. Joel., I. Westrom, B. Rui., and I. Messing. 2017. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil. *Field Crop Res.* 200: 143-162.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding and J. B. Dixon. 1996. Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57: 289-375.
- Cuanalo de la C., H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Tercera edición. Centro de edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Czyż, E.A. 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley, *Soil Till. Res.* 79: 153-166.
- Gill, R. and R.B. Jackson. 2000. Global Patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phyt.* 81:275-280.
- Habarurema, E. and K.G. Steiner. 1997. Soil suitability classification by farmers in southern Rwanda. *Geoderma* 79: 75-87.
- Hulugalle R., K. J. Nilantha, D. K. Broughton and Y. Tan. 2015. Fine root production and mortality in irrigated cotton, maize and sorghum sown in Vertisols of northern New South Wales, Australia. *Soil Till. Res.* 146: 313-322.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Censo de Población y vivienda 2010. Mapa digital de México V6.1. Consultado en marzo de 2015. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>.
- Inoubli, N., D. Raclot, R. Moussa, H. Habaieb and Y. Le Bissonnais. 2016. Soil cracking effects on hydrological and erosive processes: a study case in Mediterranean cultivated vertisols. *Hydrol. Process.* 30: 4154-4167.
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Krasilnikov, P., M.C. Gutiérrez-Castorena, R.J. Ahrens, C.O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. *The Soil of Mexico*. World Soil Series. Springer Verlag. Netherlands. 181 pp.
- Licona, A., C. A. Ortiz-Solorio, M. C. Gutiérrez-Castorena y F. Manzo. 2006. Clasificación local de tierras y tecnología del policultivo café plátano para velillo-sombra en comunidades cafetaleras. *Terra* 24(1): 1-7.
- Linh T.B., T. Sleutel, V.T. Guong, L.V. Khoa and W. Cornelis. 2015. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture. *Soil Till. Res.* 154:44-52.
- Lleverino G., E., C. A. Ortiz-S. y M. C. Gutiérrez-Castorena. 2000. Calidad de los mapas de suelos en el ejido de Atenco, Estado de México. *Terra.* 18: 103-113.
- López-Bellido, R.J., V. Muñoz-Romero, F.J. López-Bellido, C. Guzmán and L. López-Bellido, 2016. Crack formation in a mediterranean rainfed Vertisol: Effects of tillage and crop rotation. *Geoderma* 281: 127-132.
- Mu, X., Y. Zhao, K. Liu, B. Ji, H. Guo, Z. Xue and C. Li. 2016. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat–maize cropping system on the North China Plain. *Eur. J. Agron.* 78: 32-43.
- Newman E.I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. of Appl. Ecol.* 3: 139-145.
- Ortiz-Solorio, C. A., 2010. Edafología. 8ª Edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. 327 pp.
- Ortiz-Solorio, C. A. y M. C. Gutiérrez-Castorena. 2001. La Etnoedafología en México: Una Visión Retrospectiva. *Rev. Etnobiología* 1: 44-62.
- Ortiz-Solorio., C. A., D. Pájaro-Huertas. y V. M. Ordaz-Chaparro. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Osunade, A.M.A. 1988. Soil suitability classification by small farmers, *Professional Geographer* 40: 194-201.
- Prudencio, C.Y. 1993. Ring management of soils and crops in the West African semi-arid tropics: The case of the Mossi farming system in Burkina Faso. *Agr. Ecosyst. Environ.* 47: 237-264.

- Reséndiz-Paz, M.L., M.C. Gutiérrez-Castorena, E. V. Gutiérrez-Castorena, C.A. Ortiz-Solorio, L. Cajuste-Bontemps and P. Sánchez-Guzmán. 2013. Local Knowledge and Management of Anthrosols in the Valley of Mexico. *Geoderma* 193-194: 41-51.
- Rahman, M.T., Q.H. Zhu, Z.B. Zhang, H. Zhou and X. Peng. 2016. The roles of organic amendments and microbial community in the improvement of soil structure of a Vertisol, *Appl. Soil Ecol.* 11: 84-93.
- Sánchez-Guzmán, P., C.A. Ortiz-Solorio, M. C. Gutiérrez-Castorena y J.D. Gómez-Díaz. 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra*. 20:359-369.
- Seiffert, S., J. Kaselowsky, A. Jungk and N. Claassen. 1995. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. *Agron. J.* 87: 1070–1077.
- Silver, W. and Miya, R. 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia* 129: 407-419.
- Soil Survey Staff. 2014. *Soil Taxonomy*. 12th edition. United States Department of Agricultural. USA.
- Steingrobe, B., H. Schmid, R. Gutser and N. Claassen. 2001. Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems. *Biol. Fert. Soils* 33:331-339.
- Van Reewijk, L. P. 1993. *Procedures for Soil Analysis*. Technical paper n° 9. 4th Edition. ISRIC. Wageningen, Netherlands.
- van Noordwijk, M.G., H. Brouwer, F.W. Koning, W. Meijboom and W. Grzebisz. 1994. Production and decay of structural root material of winter wheat and sugar beet in conventional and integrated cropping systems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 51: 99-113.
- Wang C., W. Liu, Q. Li, Q. Ma, Q. Lu, W. Feng, L. Xie, Y. Zhu and T. Guo. 2014. Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions. *Field Crop. Res.* 165: 138-149.
- Williams, B. J. and C. A. Ortiz-Solorio. 1981. Middle american folk soil taxonomy. *Ann. Assoc. Amer. Geographers* 71(3): 335-358.
- Wilson, M.G., M.C. Sasal and O.P. Caviglia, 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth, *Geoderma* 192: 354-361.
- Xu, C., H. Tao, B. Tian, Y. Gao, Y. Ren and P. Wang. 2016. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat. *Field Crop. Res.* 198: 268-275.
- Yuan, Z., and H. Y. Chen. 2010. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age, literature review and meta-analyses. *Crit. Rev. Plant Sci.* 29: 204–221.
- Zhang, X., and W. Wang. 2015. The decomposition of fine and coarse roots: their global patterns and controlling factors. *Scientific Reports* 5: 9440.

CAPÍTULO III

LA DESCOMPOSICIÓN DE LAS RAÍCES Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA DEL SUELO: ANÁLISIS IN SITU Y MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN DE SECCIONES DELGADAS

LA DESCOMPOSICIÓN DE LAS RAÍCES Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA DEL SUELO: ANÁLISIS *IN SITU* Y MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN DE SECCIONES DELGADAS

ROOT DECOMPOSITION AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE SOIL STRUCTURE: *IN SITU* ANALYSIS AND HIGH-RESOLUTION MOSAICS OF THIN SECTIONS

Carlos Alberto **Torres-Guerrero**¹, Ma. del Carmen **Gutiérrez-Castorena**¹, Juan Manuel **Herrera**², Edgar V. **Gutiérrez-Castorena**³, Carlos Alberto **Ortiz-Solorio**¹

RESUMEN

La producción y descomposición de las raíces en agrosistemas modula los cambios en la estructura del suelo. Sin embargo, la cuantificación de este fenómeno está limitada por el uso de técnicas destructivas que impiden relacionarlo a diferentes escalas. El objetivo de esta investigación fue cuantificar la producción y descomposición de raíces finas de maíz (<2 mm) *in situ*, alterada e inalterada para relacionarlas con la estructura del suelo. Núcleos de crecimiento interno se instalaron y monitorearon mensualmente en cuatro parcelas experimentales (tratamientos): dos suelos arcillosos (Vertisol e Inceptisol) y dos manejos agronómicos monocultivo de maíz (M) o rotación maíz-avena (RT) y se obtuvieron las tasas de producción y mortalidad relativas. Además, se colectaron muestras inalteradas de suelos para elaborar secciones delgadas. Mosaicos de alta resolución (0.0026 mm pixel⁻¹) se construyeron con imágenes secuenciales tomadas en toda la superficie de la sección delgada (1865 mm² con 266, 428571 de píxeles o de 1688 mm² con 241, 142857 píxeles) para identificar, aislar y cuantificar los componentes del suelo. Cada mosaico fue procesado mediante el análisis de componentes principales para eliminar datos redundantes y obtener los componentes que representaran la mayor parte de la información. Estos componentes se visualizaron generando falsos colores en las bandas roja y verde para delimitar los diferentes constituyentes del suelo usando la varianza como criterio de clasificación. La mayor producción y mortalidad de raíces se registró en los núcleos de Vertisols+RT, los cuales concuerdan con los calculados en los mosaicos. Este fenómeno influyó la ruptura de agregados medios y gruesos y mayor abundancia de clases finas; sin embargo, cuando las raíces no estaban presentes los agregados >1000 µm dominaron. Con respecto a la estructura en las secciones delgadas fue fuertemente desarrollada al inicio y final del cultivo con poros de empaquetamiento compuesto y moderadamente desarrollada en la etapa intermedia con una gran cantidad de poros fisura y

agregados medios y gruesos. La combinación de estas dos técnicas permite monitorear y relacionar la actividad de las raíces con los componentes del suelo a diferentes escalas sin perder resolución y cuantificar el desarrollo estructural de un suelo durante un ciclo agrícola.

Palabras clave: *análisis de imágenes, componentes principales, núcleos de crecimiento interno, suelos arcillosos, componentes del suelo*

INTRODUCCIÓN

La cantidad y el tamaño de las raíces son considerados factores fundamentales para promover el desarrollo de la estructura del suelo. Causan la reorganización de las partículas del suelo generando fragmentos y terrones (Czarnes *et al.*, 2000), al entrelazar y orientar las partículas con la ayuda de exudados radicales que sirven como agente cementante para la formación de agregados (Bronick y Lal 2005). Durante la senescencia de las raíces una mayor parte de agregados estables (peds) son formados por el crecimiento de las raíces (Gale *et al.*, 2000), en donde las raíces en descomposición funcionan como sustrato orgánico para la mesofauna y microorganismos del suelo que aportan adicionalmente C al suelo. Además, la descomposición de las raíces modifica la transformación de la materia orgánica (Cheng y Kuzyakov, 2005) y el carbono orgánico del suelo (Graaff *et al.*, 2013), ya que las raíces liberan materia orgánica particulada responsable de la formación y estabilidad de agregados (Six *et al.*, 2000).

Por otra parte, la porosidad se puede modificar durante el crecimiento y muerte de las raíces (Six *et al.*, 2004), por lo que es relevante determinar el número, diámetro, continuidad, orientación y localización debido a que las raíces son las responsables del redondeo de los agregados (Pape y Legger, 1995) y formación de poros de empaquetamiento compuesto que al ser continuos y semipermanentes permiten la aireación, retención, transporte de agua y el crecimiento de otras por descomposición de las anteriores (Rasa *et al.*, 2012).

A pesar de que se conoce que la producción y descomposición de las raíces en el manejo agronómico es relevante para la conservación de los agrosistemas, la mayoría de los estudios se han centrado en comparar los sistemas de labranza (Martínez *et al.*, 2008) o bien al tipo de cultivo. Van Noordwijk *et al.* (1994), Linh *et al.* (2015), Mu *et al.* (2016) reportaron una reducción y limitación significativa del crecimiento de los sistemas radicales cuando se implementan los monocultivos en contraste con los sistemas que cuentan con rotación de cultivos, donde las raíces encuentran una mejor microestructura para desarrollarse. Sin embargo, no se cuenta con estudios *in situ* del proceso durante un ciclo de cultivo en donde los

factores como la cantidad y descomposición de raíces en corto plazo deben de estar influyendo sobre la estructura del suelo.

En la cuantificación y análisis del crecimiento y descomposición de las raíces se emplean generalmente técnicas destructivas (Silver y Miya, 2001) que limitan la interpretación de los procesos de transformación y desarrollo de la estructura del suelo (agregación y porosidad). Dos métodos se han utilizado para resolver este problema: los núcleos de crecimiento interno y el análisis micromorfológico. El primero permite monitorear la producción y descomposición de las raíces durante el crecimiento de un cultivo sin alterar su producción *in situ* (Steingrobe *et al.*, 2001a). En tanto que el segundo se utiliza para determinar los patrones de distribución en relación a los componentes del suelo desarrollados en el núcleo.

Las desventajas de estas técnicas radican en la construcción del propio núcleo al presentar cierta artificialidad por el rellenado manual con suelo a granel que aumenta o decrece la formación de poros y estado de agregación del suelo. Por otra parte, la micromorfología emplea microfotografías aisladas de áreas pequeñas o imágenes de toda la sección delgada obtenidas con escáneres de baja resolución que impiden correlacionar las raíces con otros componentes del suelo en áreas más grandes (Sauzet *et al.*, 2017) y limitan la observación de la materia orgánica fina amorfa (Poch y Virto, 2014).

Los mosaicos de alta definición ($200 \text{ nm pixel}^{-1}$) que cubren toda la sección delgada (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016), resuelven el problema de resolución y área de estudio, así como la descripción e interpretación convencional sin perder detalles de escala. De manera que los algoritmos utilizados en el procesamiento digital de imágenes se pueden emplear para delimitar, aislar y cuantificar diferentes grados de descomposición de la materia orgánica a través de sus valores de brillantez (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018). Sin embargo, cuando se trabaja con imágenes multicapa (tres o más bandas) para el análisis espacial es recomendable utilizar la transformación de componentes principales (ACP) con la finalidad de eliminar datos redundantes y optimizar la capacidad de procesamiento en ordenadores convencionales (Campbell, 1996). En el análisis micromorfológico esta técnica ha sido empleada para condensar la información de una o varias imágenes multicapa y reducir su dimensión (Terribile y Fitzpatrick, 1995). Obteniendo como resultado una imagen o componente, en donde el primero incluye el mayor porcentaje de la varianza total de la imagen multicapa y los siguientes componentes contienen un porcentaje decreciente. Estos componentes a menudo son más fáciles de interpretar que los datos originales; además su visualización conjunta puede ser útil para desarrollar falsos colores que faciliten la clasificación de los componentes de la imagen (Ng, 2017) o del suelo específicamente.

Las hipótesis que se plantean son: la producción y descomposición de las raíces determinan la dinámica estructural del suelo a lo largo de un ciclo de cultivo y dichos procesos están relacionados con la formación de diferentes tamaños de agregados a diferentes escalas.

Los objetivos de esta investigación fueron: 1) cuantificar la producción y descomposición de raíces finas de maíz (< 2 mm) a través de núcleos de crecimiento interno; y mosaicos de alta resolución en secciones delgadas, 2) delimitar y cuantificar los componentes del suelo; y 3) relacionar ambos resultados con la formación de agregados de diferentes tamaños y las modificaciones en la porosidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el ejido de Vega de Madero, Hidalgo, México dentro de las coordenadas 19°58'-19°59' N y 99°25' - 99°27' O (Figura 1) con elevación de 2350 msnm. Su clima es templado semi-húmedo con lluvias en verano, con precipitación total anual promedio de 892 mm y temperatura media anual de 12 °C. La vegetación es inducida en su totalidad que comprende cultivos de maíz forrajero, frijol y avena principalmente, aunque en algunas ocasiones se cultivan hortalizas (INEGI, 2016).

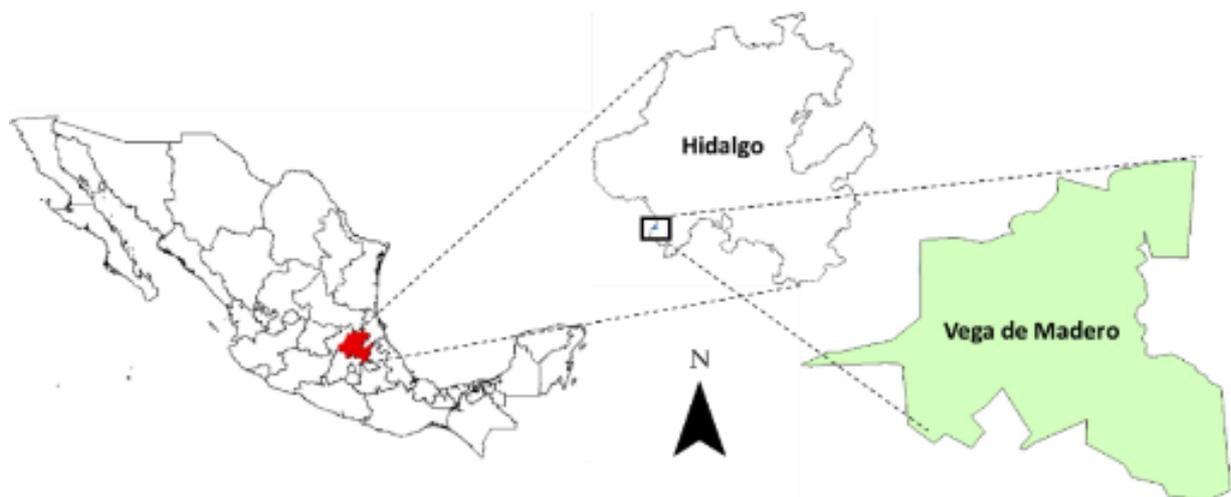


Figura 1. Localización del ejido Vega de Madero, Hidalgo en el territorio nacional.

En el área de estudio se presentan suelos con altos contenidos de arcilla y se clasifican como: Inceptisols (*Typic Dystrustepts*) o Vertisols (*Udic Haplausterts*) (Torres-Guerrero *et al.*, 2017). Algunos parámetros físicos y químicos de los dos suelos se reportan en el Cuadro 1. Las

parcelas son irrigadas sólo una vez por ciclo agrícola, periodo correspondiente antes de la siembra sin riegos posteriores.

Cuadro 1. Clasificación y algunas propiedades físicas y químicas de los suelos presentes al momento de la siembra en las parcelas experimentales del ejido Vega de Madero Hidalgo.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Clase Textural	Color (10YR)		*Dap (g cm ⁻³)	MO (%)	pH
				Seco	Húmedo			
<i>Inceptisol (Typic Dystrustepts)</i>								
Ap	0-8	60	Arcilla			1.65	0.97	6.8
Ap2	8-26	60	Arcilla	3/2	2/1	1.59	1.29	6.8
Bw	26-33	51	Arcilla			1.78	1.29	7.2
2Cr	33-45	34	Franco-Arcilloso			1.66	0.51	7.5
<i>Vertisol (Udic Haplausterts)</i>								
Ap	0-15	57	Arcilla			1.52	4.25	6.2
B _{ss}	15-40	60	Arcilla	2/1	2/1	1.63	1.54	7.0
B/C	40-55	66	Arcilla			1.54	0.58	7.7

*Dap. Densidad aparente

Trabajo de campo

A partir del levantamiento de suelos realizado por Torres-Guerrero *et al.* (2017) se seleccionaron parcelas representativas de los dos tipos de suelo y manejos agronómicos característicos del ejido: labranza tradicional que consiste en barbecho, rastreo y nivelación del terreno; con monocultivo de maíz (M) y sin rotación de cultivo maíz-avena (RT).

Los factores de variación fueron tipos suelo, con y sin rotación de cultivo para medir la producción y descomposición de las raíces finas de maíz (< 2mm). El monitoreo duró seis meses, dando inicio en mayo y finalizando en noviembre de 2015.

Los núcleos de crecimiento interno se instalaron en tres plantas seleccionadas aleatoriamente a 10 cm de distancia del tallo con dirección al surco según la propuesta metodológica de Steingrobe *et al.* (2001a). Cada 30 días, los núcleos fueron reemplazados por nuevos y resguardados en hielo durante el muestreo en campo para su traslado al laboratorio. Asimismo, se colectaron mensualmente muestras inalteradas en plantas a 10 cm de la zona de influencia de las raíces y a 10 cm de profundidad utilizando cajas tipo Kubiena. También, se utilizó una barrena espiralada para tomar muestras y medir el contenido de humedad gravimétrico.

Análisis de laboratorio

Producción y descomposición de raíces en núcleos de crecimiento interno. En el laboratorio, los núcleos de crecimiento se mantuvieron a una temperatura de 4 °C hasta su análisis, para evitar la descomposición de las raíces; mientras que las muestras de la barrena

espiralada se secaron en una mufla a 60 °C hasta obtener su peso constante y calcular el contenido de humedad del suelo (Van Reeuwijk, 1993).

Las raíces finas de maíz de cada núcleo se separaron con tamices de entre 0.5 y 2 mm, para calcular su longitud y la densidad radical con el método del intercepto de Newman (1966). En seguida, se secaron en una estufa a 60 °C para cuantificar su biomasa seca y calcular los parámetros de productividad relativa, mortalidad relativa e índice de recambio según Steingrobe *et al.* (2001a).

Elaboración de secciones delgadas. Las muestras inalteradas fueron secadas al aire bajo sombra e impregnadas con resina poliéster y monoestireno en una relación 3:1. La elaboración de las secciones delgadas de suelo (5 ×7 cm ×30 µm) se llevó a cabo de acuerdo con Murphy (1986) y los componentes del suelo (porosidad, agregados, raíces y materia orgánica en diferentes grados de descomposición) se describieron utilizando la terminología propuesta por Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003).

Adquisición de imágenes

Las secciones delgadas fueron fotografiadas en su totalidad de manera secuencial empleando una cámara digital Canon Rebel T3, 12.2 Megapixels, acoplada a un microscopio petrográfico Olympus BX51, a un aumento de 2× en luz polarizada plana. Cada imagen fue capturada en el formato original de la cámara *.CR2 y transformada a formato IMG. La resolución de cada foto fue de 4290 x 2856 pixeles (0.0026 mm pixel⁻¹) a una profundidad 24 bits (8 bits × 3 bandas en estándar RGB).

Elaboración de los mosaicos

Los mosaicos de alta resolución se construyeron de acuerdo con la técnica propuesta por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016; 2018). En la Figura 2 se reporta el diagrama general de la construcción de los mosaicos. Cada uno de ellos está integrado ya sea por una secuencia de 7 x 7 (49 microfotografías) y otra de 7 x 6 (42 microfotografías), con áreas totales de 1865 mm² (266, 428 571 de pixeles) o 1688 mm² (241 142 857 pixeles) respectivamente.

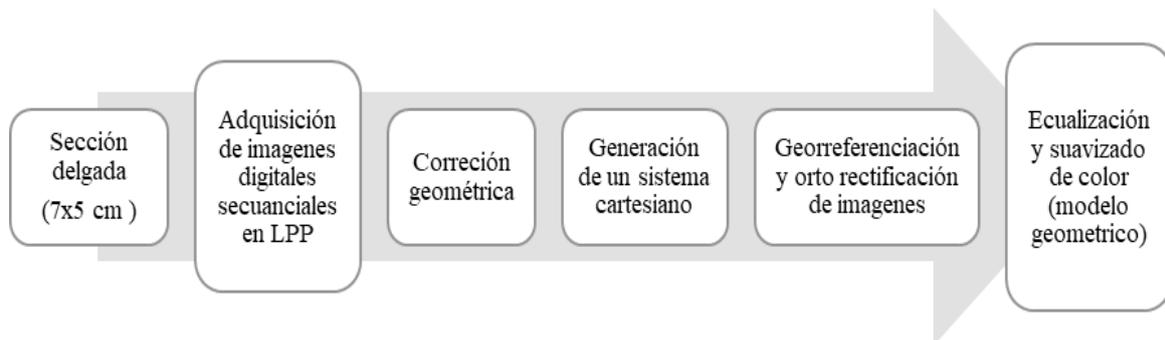


Figura 2. Secuencia seguida para la construcción de mosaicos en luz polarizada plana (LPP) a una magnificación de 2x (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016; 2018).

Transformación de componentes principales (ACP)

Los mosaicos fueron analizados mediante análisis de componentes principales (Figura 3): el primero, representa el mayor porcentaje de la varianza de cada imagen (> 90%); mientras que el segundo describe la mayor cantidad de varianza restante y así sucesivamente. Cada componente resultante es independiente y ortogonal con respecto del anterior (Manly y Alberto, 2016). En este caso se seleccionaron los primeros dos componentes para la posterior determinación de los componentes del suelo.

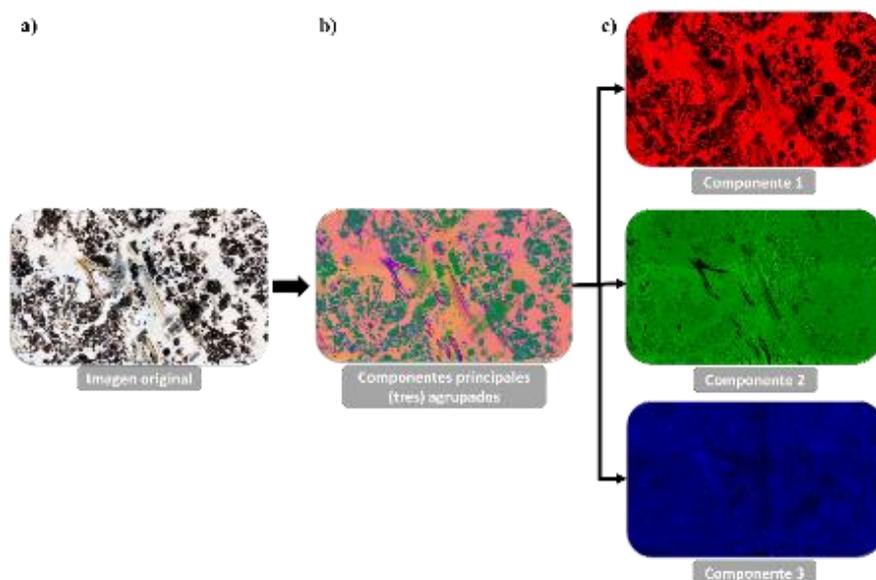


Figura 3. Imágenes resultantes del análisis de componentes principales de un mosaico (a). El primer resultado son los tres componentes agrupados en una sola imagen (b) y posteriormente pueden ser visualizados por separado (c) para delimitar con mayor facilidad los componentes del suelo.

Delimitación de componentes del suelo. Los componentes presentes fueron segmentados mediante una clasificación no supervisada en la imagen compuesta utilizando el comando *ISO cluster unsupervised* en ArcGis v.10.1. El resultado de esta clasificación fue un mapa temático con 30 categorías agrupadas de acuerdo con la varianza de los valores de cada pixel. Posteriormente, se realizó una reclasificación visual con la ayuda de la imagen original (color

verdadero) y los dos componentes, visualizados en falsos colores. En este proceso se delimitaron además agregados, raíces, espacio poroso y materia orgánica fina amorfa en formato ráster tal como se muestra en la Figura 4. Posteriormente, las imágenes fueron vectorizadas para cuantificar cada componente del suelo. A continuación, se describe el proceso que se llevó a cabo en cada uno de los constituyentes del suelo.

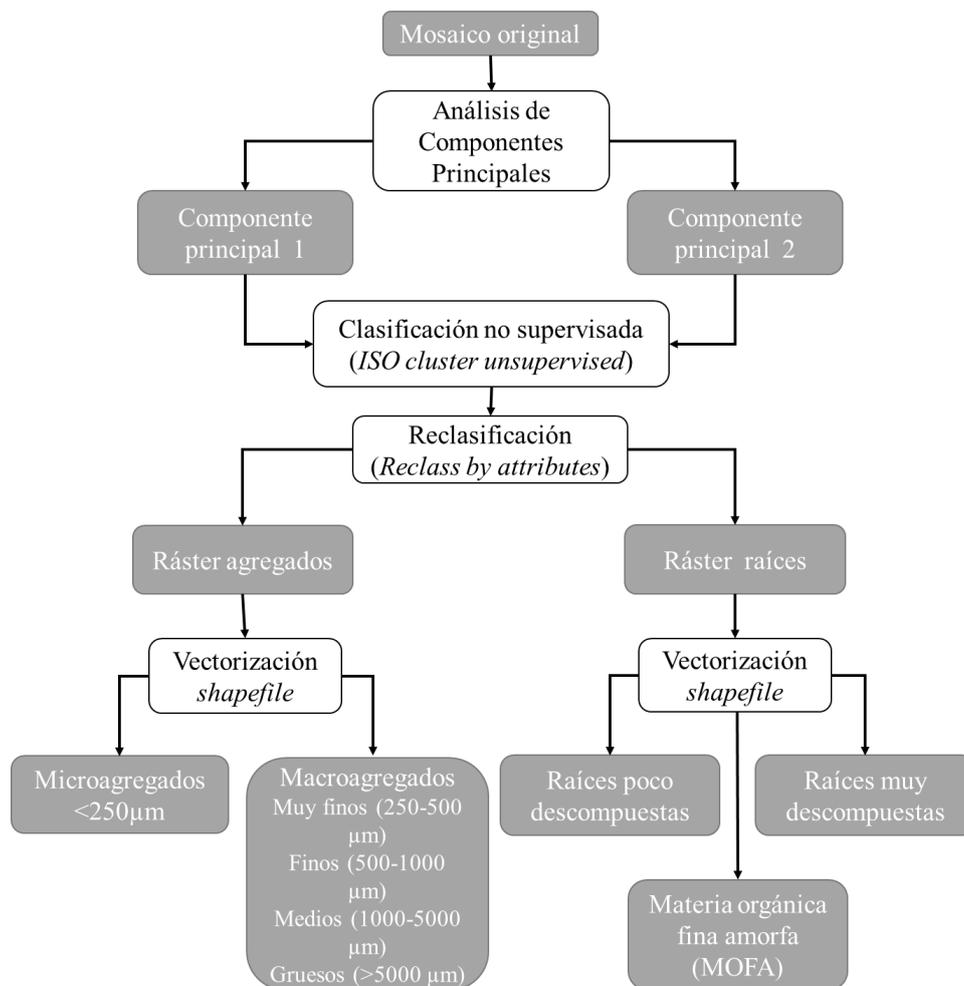


Figura 4. Procedimientos realizados para delimitar los componentes del suelo. Los recuadros grises representan resultados o imágenes obtenidas de un proceso y los recuadros blancos procesos llevados a cabo en ArcGis v.10.3.

Raíces en diferentes estados de descomposición. Las raíces se delimitaron con base en la estructura celular visible y opacidad según los criterios de Stoops (2003) y Bullock *et al.* (1985) a partir de varianzas similares. Con la vectorización, las raíces se separaron en dos categorías: 1) raíces poco descompuestas, que corresponde a todos los fragmentos $>100 \mu\text{m}$, ya que en estas tallas se pueden localizar estructuras celulares completas (Zaiets y Poch, 2016); y 2) raíces

muy descompuestas con fragmentos <100 µm y sin estructura celular, opacas y con varianzas correspondientes a raíces.

Agregados del suelo. La imagen vectorizada se utilizó para cuantificar y dividir los agregados en cinco clases: I) microagregados (<250 µm o 8,180 píxeles), II) macroagregados muy finos (250-500 µm o 8180-29,254 píxeles), III) finos (500-1000 µm o 29254-117,164 píxeles), IV) medios (1000-5000 µm o 117,164-3,272,000 píxeles) y V) gruesos (>5000 µm o 3,272,000 píxeles), de acuerdo con Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018). Cabe señalar que la separación de estos agregados se hizo partiendo del supuesto de que las partículas del suelo son circulares en su mayoría.

Materia orgánica fina amorfa (MOFA). Este componente del suelo fue reconocido y diferenciado de la micromasa por su opacidad, donde la estructura celular es ausente según los criterios de Stoops (2003, 2005). En el ACP, las varianzas seleccionadas para clasificarse como materia orgánica fina amorfa (MOFA) fueron las correspondientes a los valores nulos de brillantes y que en la clasificación no supervisada corresponden a los valores de 0 en RGB.

RESULTADOS

Producción y descomposición de raíces en núcleos de crecimiento interno

Los parámetros radicales calculados no evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos ensayados en Inceptisols para ninguno de los meses muestreados. Por el contrario, en Vertisols la biomasa, densidad radical y la humedad gravimétrica difirieron estadísticamente en el tratamiento donde se empleó RT en comparación con M (Cuadro 2). De hecho, los valores fueron hasta 5 veces mayores para la biomasa y la densidad radical; mientras la humedad tuvo registros con diferencias de hasta 6% mayores en el mes de septiembre para RT.

Cuadro 2. Parámetros radicales calculados en los núcleos de crecimiento interno y contenidos de humedad gravimétrica.

Tratamiento	<i>Inceptisol (Typic Dystrustepts)</i>				<i>Vertisol (Udic Haplausterts)</i>			
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
<i>Biomasa radical (t ha⁻¹)</i>								
Monocultivo	2.18 ^a	2.41 ^a	2.66 ^a	0.81 ^a	1.87 ^a	3.54 ^a	2.35 ^a	1.96 ^a
Rotación	1.90 ^b	2.00 ^a	2.35 ^a	0.51 ^a	6.57 ^b	10.47 ^b	10.28 ^b	6.77 ^b
<i>Densidad radical (cm cm⁻³)</i>								
Monocultivo	1.26 ^a	1.40 ^a	1.54 ^a	0.47 ^a	0.087 ^a	2.05 ^b	1.36 ^a	1.13 ^a
Rotación	1.10 ^a	1.16 ^a	1.36 ^a	0.30 ^a	3.12 ^b	6.07 ^c	5.95 ^a	3.92 ^b
<i>Porcentaje de humedad gravimétrica (%)</i>								
Monocultivo	26 ^a	25 ^a	28 ^a	23 ^a	33 ^a	33 ^a	35 ^a	31 ^a
Rotación	24 ^a	23 ^a	26 ^a	21 ^a	39 ^b	39 ^b	33 ^a	35 ^b

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos.

La tasa de productividad relativa mostró una directriz en RT en Vertisols, en la cual se puede apreciar una tendencia irregular en el ciclo de cultivo completo (Figura 5) con valores similares al inicio (0.56) y término del cultivo (0.56) y los máximos registrados en el mes de octubre (0.69). Los demás tratamientos presentaron una tendencia regular en la que la tasa de mortalidad disminuyó hacia el final del ciclo de cultivo, pero dichos valores resultaron ser similares estadísticamente.

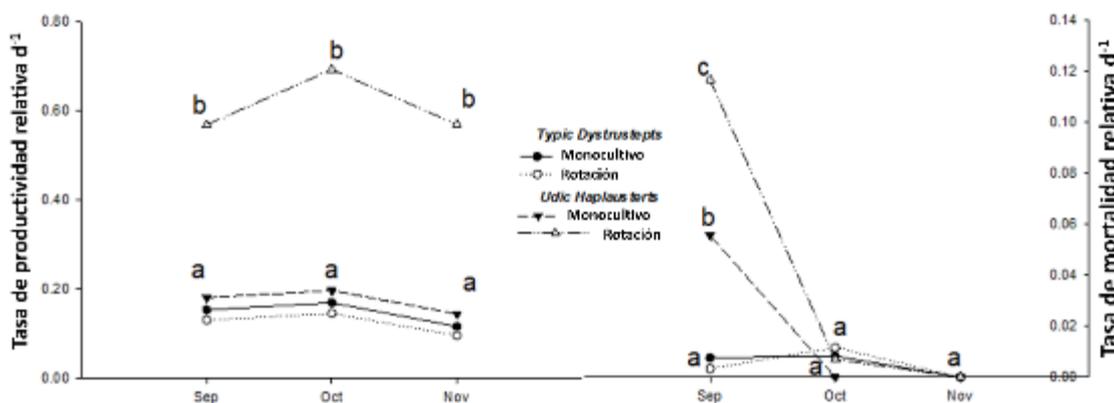


Figura 5. Tasas de producción y mortalidad relativas de las raíces finas de maíz en el ciclo de cultivo 2015. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos.

La tasa de mortalidad no evidenció una tendencia clara en ninguno de los tratamientos, debido a que la producción de raíces en los Inceptisols fue escasa. En estos suelos se registraron tasas de mortalidad muy bajas en comparación con los Vertisols cuyos valores fueron significativos desde el inicio del experimento; por ejemplo, RT (0.11) fue mayor que M (0.07). En los siguientes meses y hasta el término del cultivo las tasas de mortalidad fueron estadísticamente similares para todos los tratamientos con valores <0.01 (Figura 5).

Análisis micromorfológico

Al inicio y término del experimento en los dos tipos de suelos y tratamientos (M y TR) se presentaron agregados granulares y una estructura de bloques subangulares bien desarrollados con un patrón de distribución relacionada (PDR) grueso/fino (g/f) enaúlica, y poros de empaquetamiento compuesto. No obstante, la estructura se modificó en los meses intermedios generando bloques subangulares de tamaño grueso y fisuras, y un PDR g/f porfírica de espacio doble y abierto. Los granos minerales representan $<10\%$ en la sección delgada y se componen principalmente de feldespatos (8%) y cuarzos (2%).

Esto significa que durante el crecimiento del cultivo se colapsaron las partículas, aunque el proceso fue mucho más evidente en M de Vertisols. En las Figura 6 se reporta el desarrollo estructural de los dos suelos estudiados.

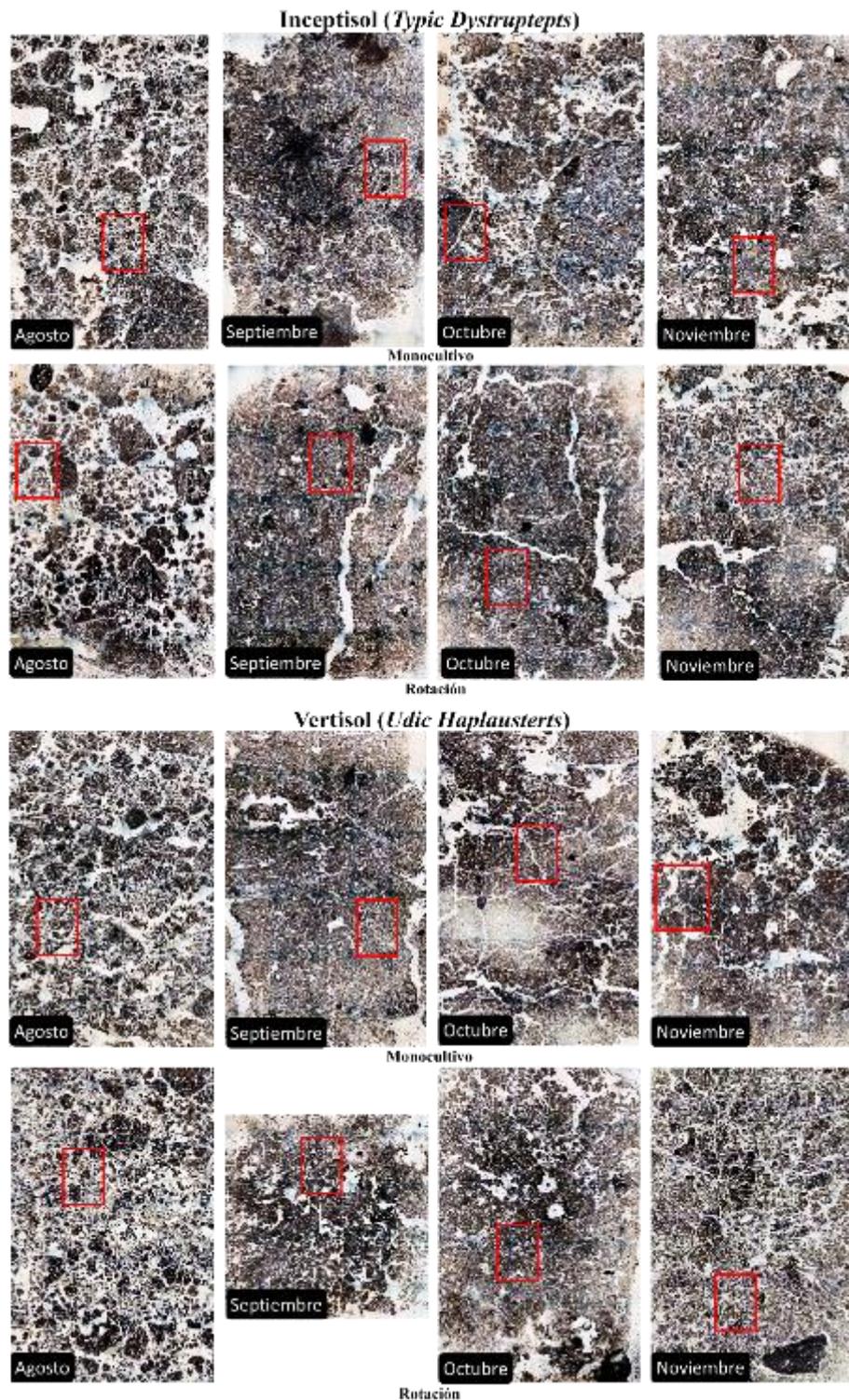


Figura 6. Desarrollo secuencial de la estructura en los tratamientos ensayados en ciclo de cultivo 2015. Se observa al inicio de todos los tratamientos una estructura desarrollada y abierta por las prácticas de laboreo. En la etapa intermedia la estructura (apedal en algunos casos) se colapsa formando grietas y disminuyendo la porosidad. Finalmente, la estructura comienza a desarrollarse nuevamente en la etapa final del cultivo.

Transformación de componentes principales

Los valores acumulativos del monitoreo mensual de los mosaicos en el análisis de imágenes se muestran en el Cuadro 3, y son el resultado de la transformación de componentes principales para emplear las varianzas como criterio de clasificación y reducir la información redundante.

Cuadro 3. Eigenvalores y porcentajes acumulativos del análisis de componentes principales de los mosaicos.

	Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre		
	EV	%EV	%AC	EV	%EV	%AC	EV	%EV	%AC	EV	%EV	%AC
<i>Inceptisol (Typic Dystrustepts)</i>												
<i>Monocultivo</i>												
Componente 1	19047.80	98.78	98.78	16835.31	98.11	98.11	16446.98	97.62	97.62	17591.82	97.65	97.65
Componente 2	179.84	0.93	99.71	263.27	1.53	99.64	328.48	1.95	99.57	315.29	1.75	99.40
Componente 3	55.56	0.29	100.00	61.42	0.36	100.00	71.98	0.43	100.00	108.00	0.60	100.00
<i>Rotación</i>												
Componente 1	18803.65	98.89	98.89	18940.47	98.58	98.58	18563.96	98.76	98.76	18028.14	98.23	98.23
Componente 2	141.93	0.75	99.63	216.69	1.13	99.71	182.33	0.97	99.73	259.43	1.41	99.64
Componente 3	69.68	0.37	100.00	55.48	0.29	100.00	51.12	0.27	100.00	65.37	0.36	100.00
<i>Vertisol (Udic Haplausterts)</i>												
<i>Monocultivo</i>												
Componente 1	18471.39	98.57	98.57	17231.45	97.98	97.98	17316.65	98.10	98.10	17676.89	97.37	97.37
Componente 2	208.67	1.11	99.68	260.13	1.48	99.46	269.17	1.52	99.63	364.05	2.01	99.38
Componente 3	59.46	0.32	100.00	95.16	0.54	100.00	66.13	0.37	100	113.13	0.62	100.00
<i>Rotación</i>												
Componente 1	17689.78	98.68	98.68	16297.64	97.86	97.86	17611.66	97.94	97.94	17876.97	98.47	98.47
Componente 2	200.99	1.12	99.80	277.74	1.67	99.53	285.11	1.59	99.53	231.59	1.28	99.75
Componente 3	35.63	0.20	100.00	78.01	0.47	100.00	85.38	0.47	100.00	46.14	0.25	100.00

En todos los tratamientos, el primer componente explicó >97% de la información del mosaico y el segundo entre 0.93 y 2.01%, razón por la cual se decidió excluir el tercer componente del análisis de imágenes. Asimismo, la matriz de correlación entre componentes fue >97% en todos los casos (datos no publicados).

La visualización de los dos primeros componentes en las bandas verde (componente 1) y roja (componente 2), permitió generar imágenes con falso color (Figura 7b), las cuales sirvieron para contrastar a los constituyentes del suelo mejorando definición y facilitando su delimitación después de haber implementado la clasificación no supervisada (Figura 7c y d).

Delimitación de los componentes del suelo

Raíces. Los residuos de raíces fueron escasos en los Inceptisols, lo cual concuerda con las bajas tasas de productividad relativa obtenidas con los núcleos de crecimiento interno en estos suelos (Figuras 8 y 9). En ambos tratamientos (M y RT), la mayoría de las raíces pertenecieron a la clase de raíces muy descompuestas y fueron los meses de septiembre y octubre donde se registraron los valores más altos (0.27 y 0.38 en M y 0.84 y 0.28 en RT). Además, se observó

que estos residuos de raíces se localizaron siempre al interior de los macro-agregados. En el caso de los Vertisols, el comportamiento fue similar al Inceptisol en el monocultivo con un ligero aumento en la distribución de las raíces poco descompuestas y muy descompuestas (0.5 y 3.35% respectivamente); no obstante, este aumento no fue registrado en los meses siguientes (Figura 10).

En RT se encontraron mayores porcentajes tanto de fragmentos de raíces poco descompuestas como muy descompuestas en casi todo el ciclo de cultivo a excepción del mes de noviembre donde la producción fue escasa. En los primeros tres meses los valores fueron hasta 300% mayores con respecto de los demás tratamientos. Además, la productividad relativa hallada en los núcleos de crecimiento interno coincide con los datos registrados en la cuantificación mediante el análisis de imágenes en los mosaicos.

En cuanto a la distribución, en el primer mes de muestreo las raíces poco descompuestas alcanzaron 19% y las muy descompuestas 2%. La primera categoría estuvo relacionada con micro y macroagregados en donde las raíces están redondeado a las partículas; mientras que las raíces muy descompuestas se relacionaron en su totalidad con macro y microagregados. Al término del ciclo de cultivo, la cantidad de raíces poco y fuertemente descompuestas disminuyó hasta 0.01 y 0.39%, respectivamente y se relacionaron sólo con los macroagregados (Figura 11).

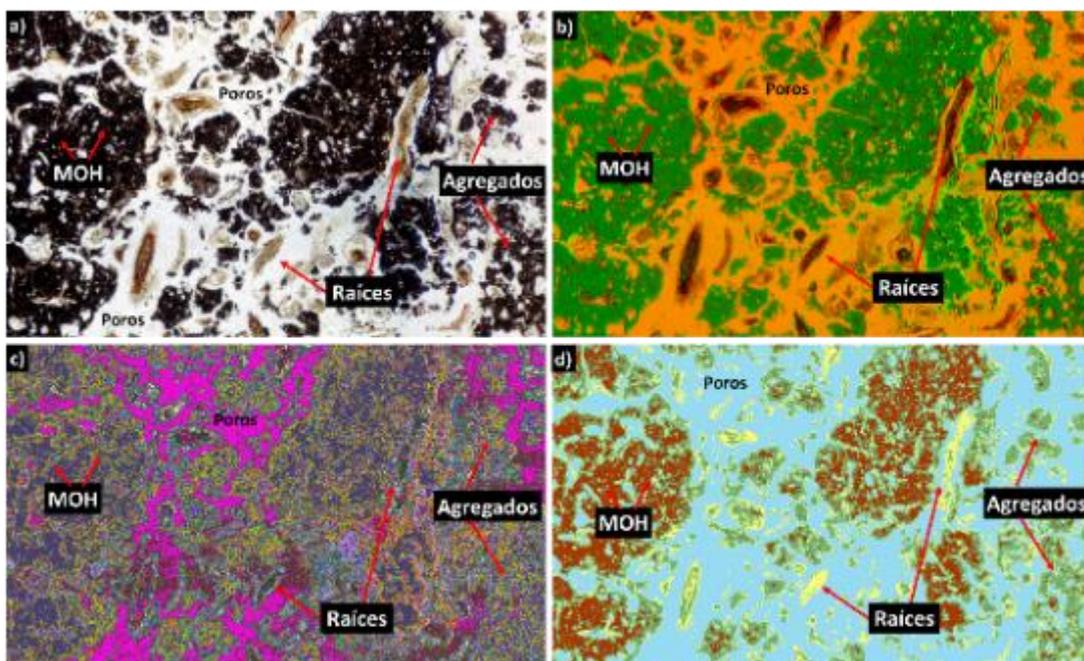


Figura 7. Proceso de aislación de componentes del suelo en los mosaicos mediante la transformación de componentes principales (b) donde se ocupan las varianzas de la imagen y se generan falsos colores, para realizar una clasificación no supervisada (c) y delimitar los componentes del suelo (d) con ayuda de la imagen real (a) y de ACP. Longitud del marco 11.054 mm.

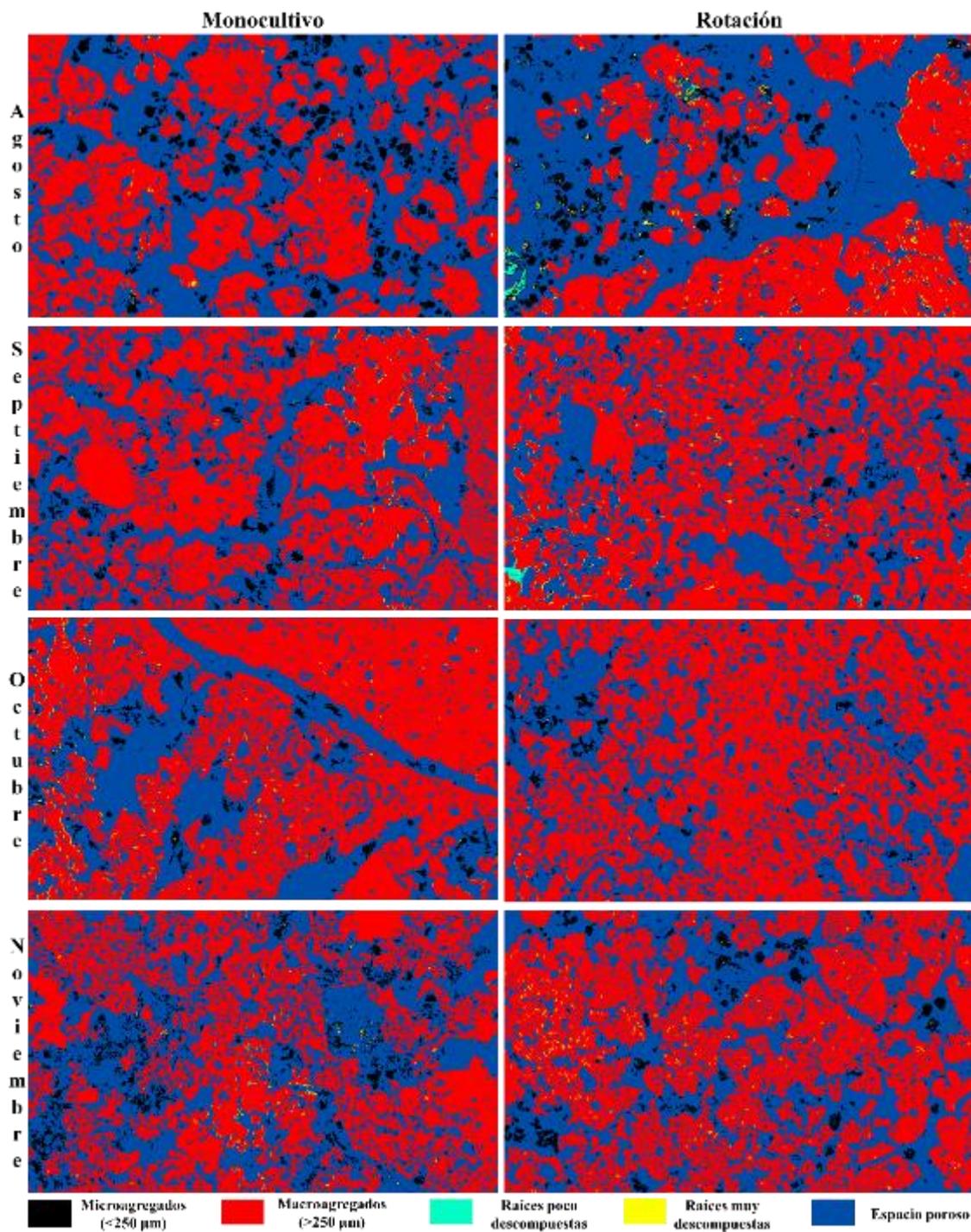


Figura 8. Distribución de las dos categorías de raíces finas (< 2mm) durante el ciclo de cultivo 2015 en el tratamiento colocado en Inceptisols. Se observan escasos fragmentos de raíces poco y muy descompuestas en ambos tratamientos y la disminución considerable de microagregados al termino del cultivo. Las figuras corresponden a las áreas señaladas en la Figura 6. Longitud del marco 8.32 mm.

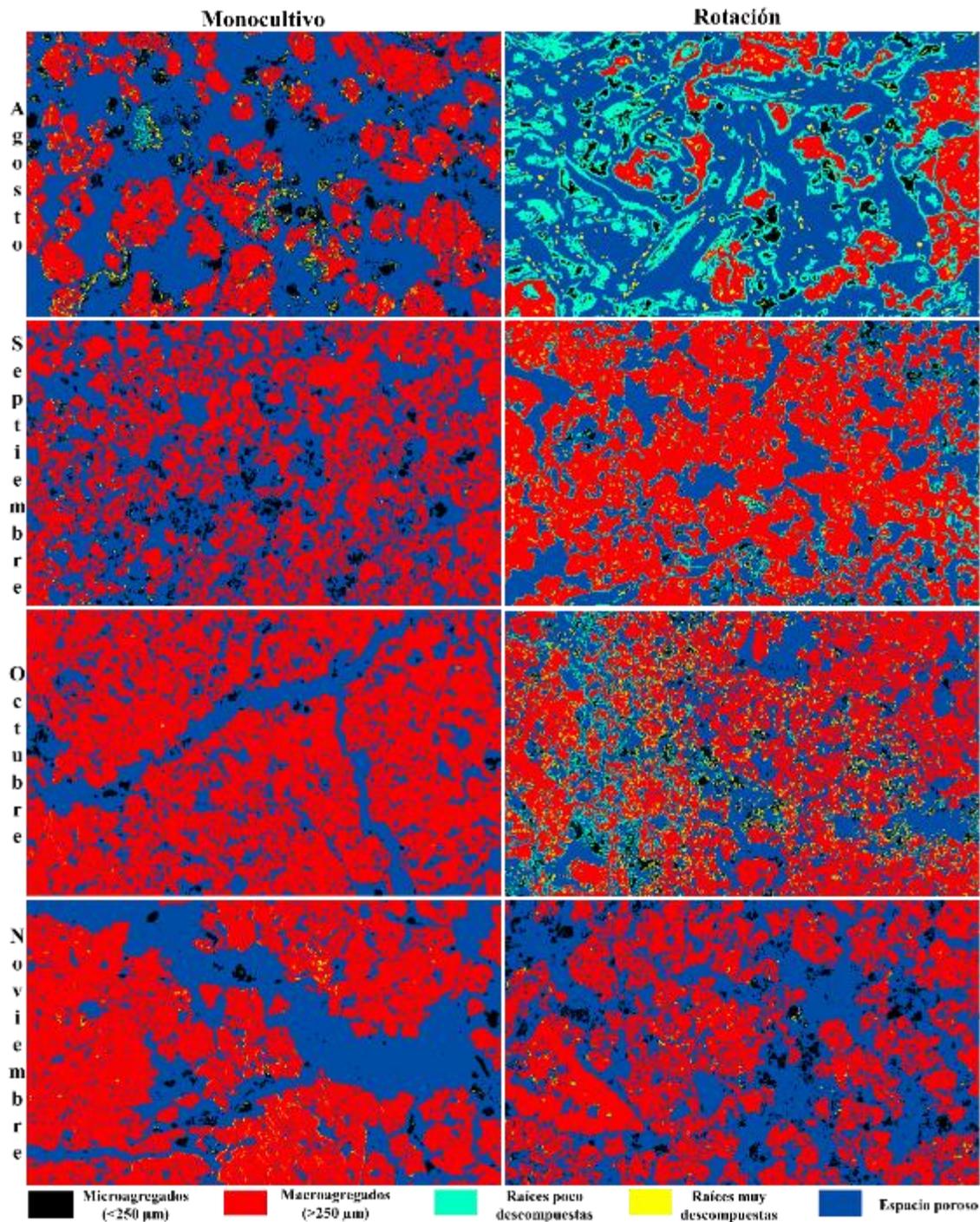


Figura 9. Distribución de las dos categorías de raíces finas (< 2mm) durante el ciclo de cultivo 2015 en el tratamiento colocado en Vertisols. El monocultivo presenta la misma tendencia que los Inceptisols, mientras que en la rotación se muestra una gran cantidad de raíces poco descompuestas que disminuyen su proporción al final del cultivo por el proceso de descomposición. Las figuras corresponden a las áreas señaladas en la Figura 6. Longitud del marco 8.32 mm.

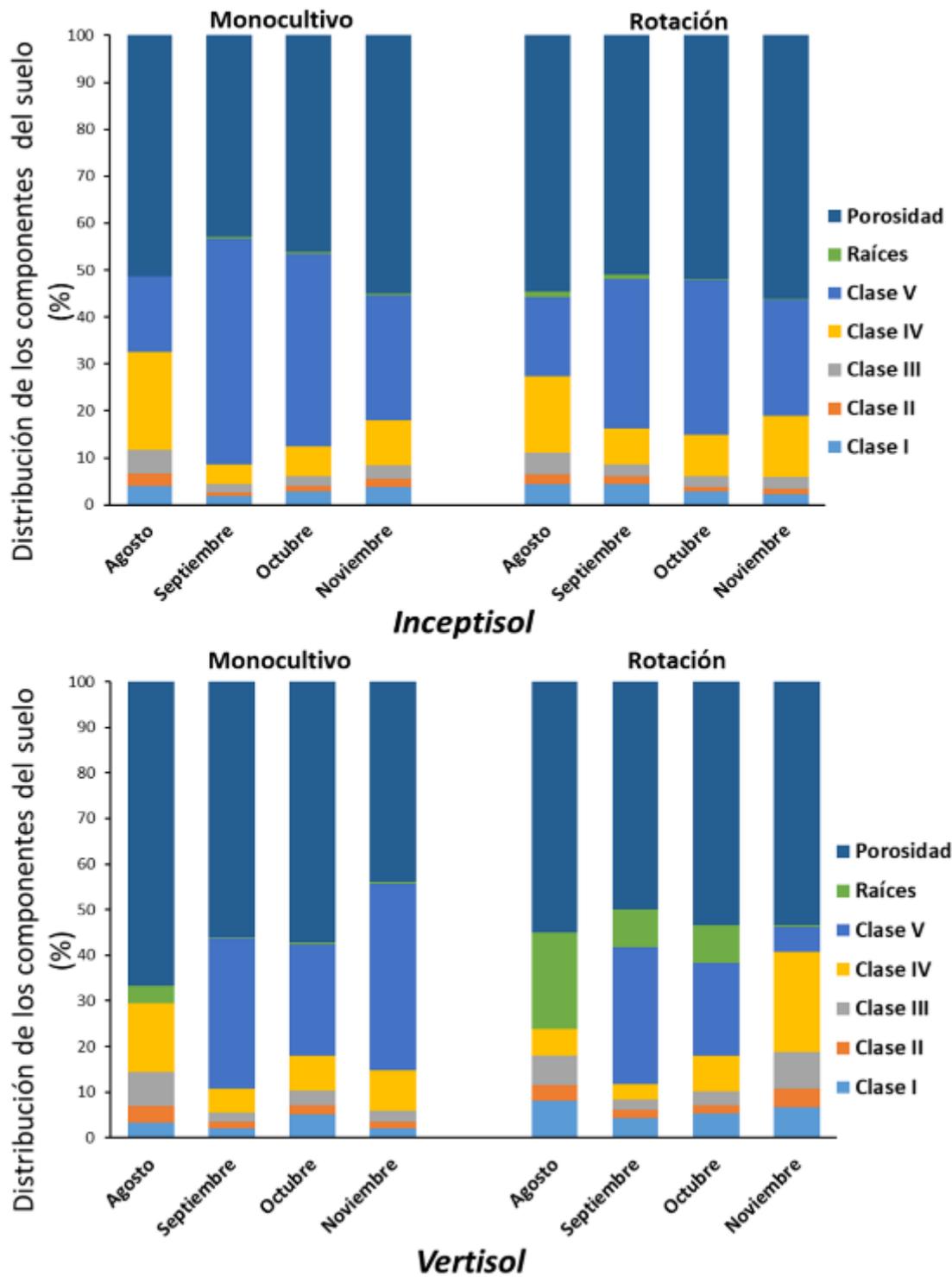


Figura 10. Distribución porcentual de los componentes del suelo en los diferentes tratamientos experimentados durante el ciclo de cultivo 2015. Clase I) microagregados (<250 μm), macroagregados II) muy finos (250-500 μm), III) finos (500-1000 μm), IV) medios (1000-5000 μm) y V) gruesos (>5000 μm).

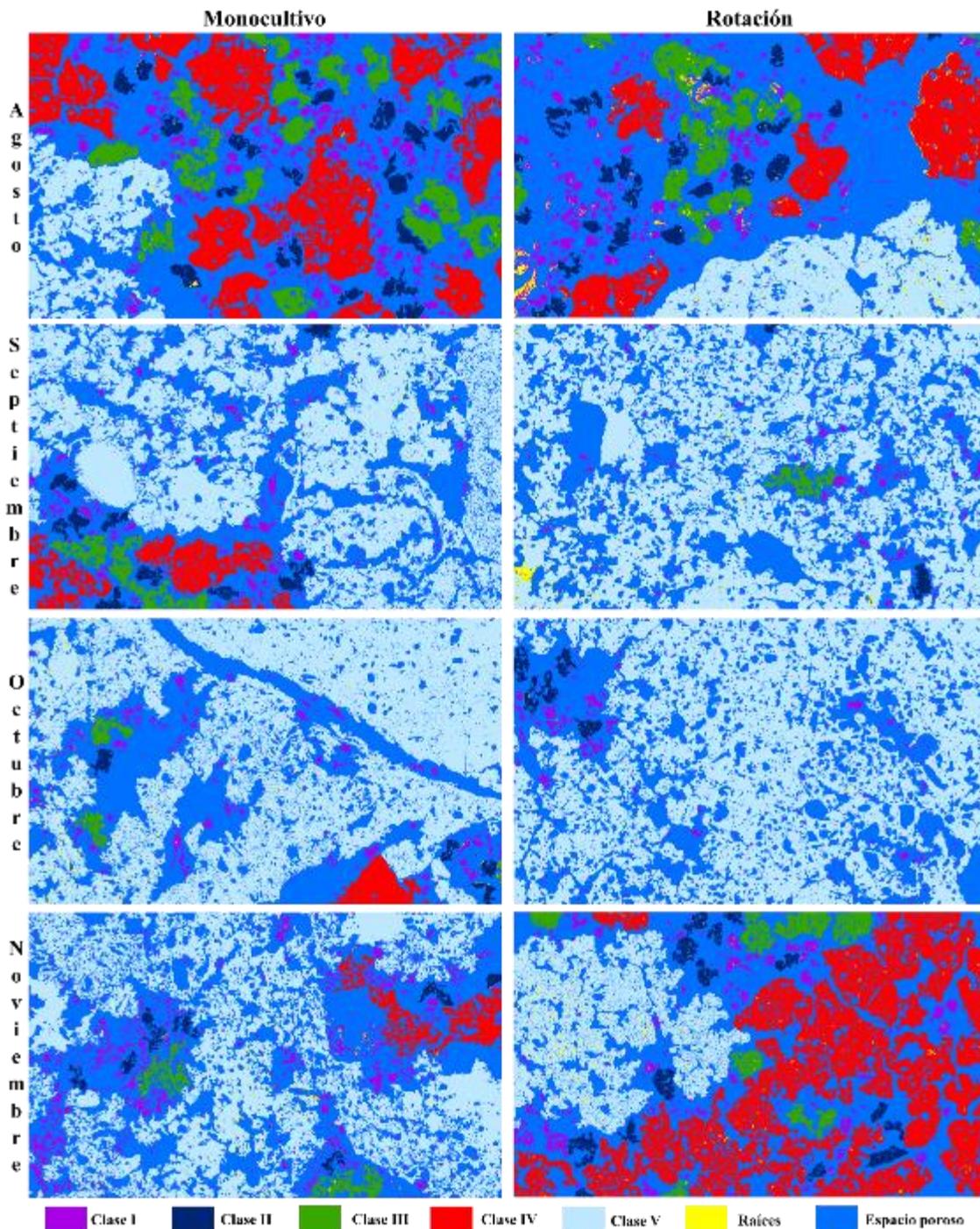


Figura 11. Dinámica y distribución de las diferentes clases de agregados del suelo en el tratamiento de Inceptisols. Clase I) microagregados (<250 μm), macroagregados II) muy finos (250-500 μm), III) finos (500-1000 μm), IV) medios (1000-5000 μm) y V) gruesos (>5000 μm). Longitud del marco 8.32 mm.

Porosidad y agregados del suelo. La distribución de la porosidad fue irregular en M en ambos suelos (Figura 12); mientras que en RT no hubo cambios a lo largo del ciclo de cultivo 2015.

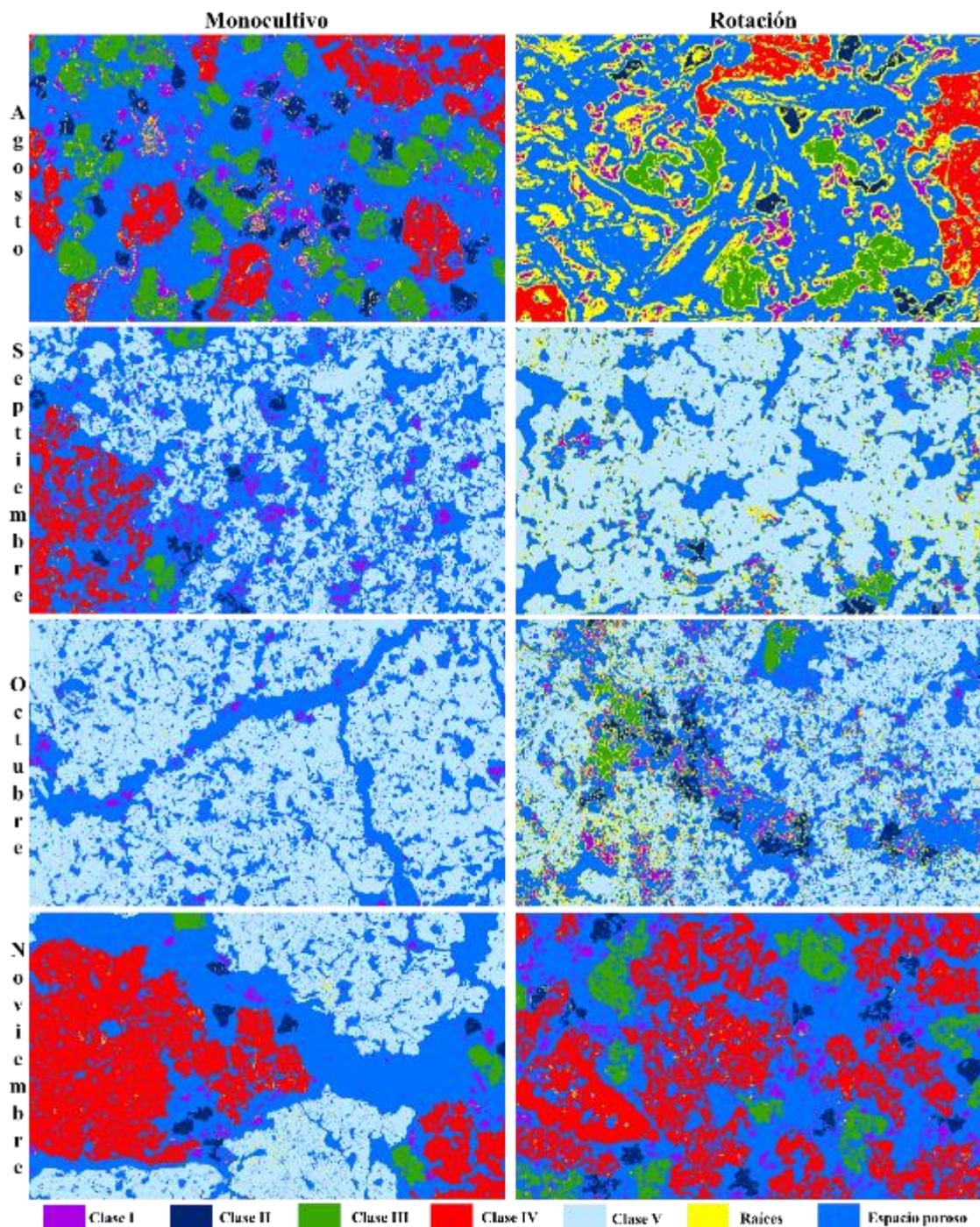


Figura 12. Dinámica y distribución de las diferentes clases de agregados del suelo en el tratamiento de Vertisols. Clase I) microagregados (<250 μm), macroagregados II) muy finos (250-500 μm), III) finos (500-1000 μm), IV) medios (1000-5000 μm) y V) gruesos (>5000 μm). Longitud del marco 8.32 mm.

Con respecto a la distribución de los agregados, en Inceptisols el micro y el macroagregados (clase II y III) presentaron el mismo comportamiento a lo largo del cultivo. Los cambios se presentaron en los macroagregados de las clases IV (decreció de 20 a 7 %) y V (incrementó de 15 hasta 45%). Este mismo comportamiento se observó en RT con cambios de menor magnitud (Figuras 11).

En Vertisols las diferencias en la distribución de los agregados del suelo fueron marcadas en todas las clases, tanto en M como en RT. Durante el crecimiento del monocultivo, los macroagregados (clase V) incrementaron de 0% hasta 40% en M, en detrimento de las clases III y IV; mientras las clases I, II y III se mantuvieron constantes. En el caso de RT, la distribución de agregados de las clases I a IV fue uniforme y con una gran proporción de raíces (hasta 19% en el mes de septiembre). A medida que avanzó el cultivo, las raíces y los agregados clase I y III disminuyeron considerablemente (de 8 hasta 2%) y se incrementó drásticamente la clase V (0 hasta 33%). Finalmente, en el último mes, esta clase se disgregó dando origen a agregados clase IV y III como los dominantes de la distribución (Figura 12).

Materia orgánica fina amorfa (MOFA). La MOFA se identificó principalmente dentro de los macroagregados con un porcentaje similar entre tratamientos (9 y 12% del total). Tanto en Inceptisols como Vertisols los agregados de clase IV y V registraron la mayor cantidad y relación con la MOFA en todos los tratamientos.

A pesar de que no se registraron diferencias significativas entre tratamientos, es de resaltar que en Vertisols y RT la MOFA, la materia orgánica fina amorfa se relacionó con los macroagregados medios y gruesos en la etapa intermedia del cultivo y se orientó hacia los poros canales (Figura 13) originados por la biota del suelo (fauna y raíces). Este fenómeno no se observó en los otros tratamientos ensayados.

Cuantificación de los componentes del suelo

En resumen, las cuantificaciones de cada componente durante el ciclo de cultivo completo se muestran en el Cuadro 4; además, es posible observar la relación que las raíces presentaron con los componentes principalmente macro y microagregados. Esta relación fue determinada de acuerdo con la presencia de cada categoría de raíces, ya sea alrededor o dentro de uno o varios de los componentes del suelo. Las relaciones se presentaron mayormente entre las raíces muy descompuestas y los macroagregados del suelo. Solo en RT de Vertisols se obtuvieron relaciones entre las raíces poco descompuestas en micros y macroagregados.

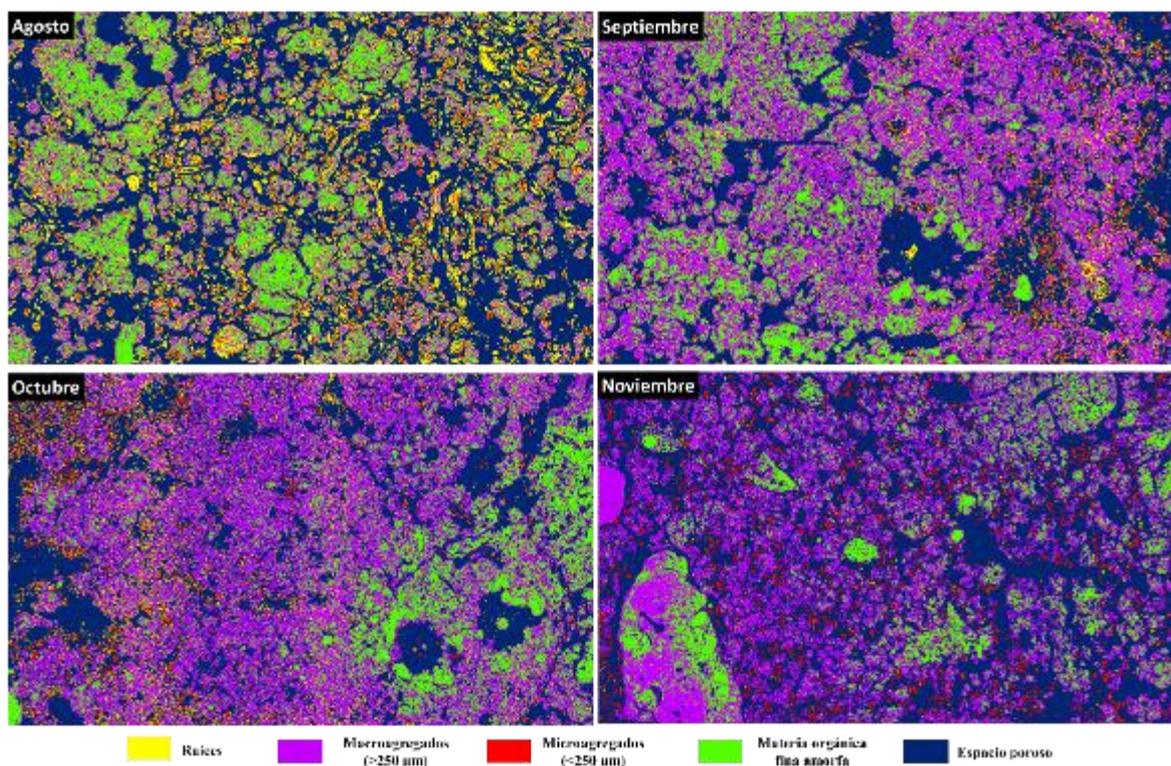


Figura 13. Desarrollo y transformaciones de los componentes del suelo en el tratamiento dónde se usó la rotación de cultivos en Vertisols. La MOFA es abundante al inicio y para los meses siguientes (septiembre y octubre) comienza a orientarse hacia los poros canales de la fauna y raíces para terminar en menor proporción dentro de los macroagregados del suelo. Longitud del marco 8.32 mm.

DISCUSION

El presente estudio fue capaz de mezclar las dos metodologías propuestas para medir la descomposición de las raíces. Una de ellas un método sencillo que no necesita de equipamiento especial y que permite tener suficientes replicas para correr análisis estadísticos como lo son los núcleos de crecimiento interno (Steingrobe *et al.*, 2001b, 2000) y el segundo capaz de implementar análisis cuantitativos que comprendan uno o varios componentes del suelo. Además, proporciona un medio de descripción e interpretación adicional a los estudios convencionales, al correlacionar espacialmente dichos componentes en áreas completas de secciones delgadas (Adderley *et al.*, 2002). Esta técnica permite interrelacionar componentes que no siempre coinciden en escala como es el caso de las bacterias con los agregados del suelo y los componentes minerales (Nunan *et al.*, 2003; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016) o los revestimientos arcillosos con la macro y microporosidad (Puentes *et al.*, 1992; Sauzet *et al.*, 2017).

Como resultado de esta combinación de metodologías se obtuvo el monitoreo completo de

la descomposición de las raíces y su influencias sobre los procesos físicos que modifican la porosidad y agregación del suelo, a diferencia de estudios anteriores en donde relacionó a las raíces con la microestructura (Moran *et al.*, 2000), la porosidad (Kodešová *et al.*, 2006) o la formación de agregados del suelo (De León-González *et al.*, 2007) de manera independiente.

El análisis a través de mosaicos de alta resolución permitió reconocer los diferentes patrones de distribución de las raíces y la relación que estas guardan con los diferentes componentes del suelo. No obstante, para llevar a cabo este análisis es necesario implementar un sistema de clasificación que permita la identificación y cuantificación correcta de los diferentes componentes del suelo. A diferencia de otros estudios donde se emplean clasificaciones supervisadas por medio de las firmas espectrales de los edaforrasgos (Aydemir *et al.*, 2004; Protz and VandenBygaart 1998; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016; 2018; Sauzet *et al.*, 2017) en este caso se decidió usar la transformación por medio del análisis de componentes principales, la cual permitió la correcta identificación de las raíces en dos diferentes estados de descomposición a través de las varianzas de las imágenes como criterio de clasificación y decrece considerablemente la información a analizar optimizando el procesamiento de las imágenes.

Transformación de componentes principales

El análisis de componentes principales resultó ser satisfactorio para la posterior clasificación de los edaforrasgos. Las ventajas de esta técnica es que se pueden observar las imágenes en falso color y contrastarlas para hacer notar los rasgos específicos. Al visualizar juntos los dos componentes seleccionados, los colores rojizos pertenecen al primer componente y los verdes al segundo (Figura 14a). Cuando estos son visualizados por separado el primer componente, que representa la mayor parte de la información de la imagen, fue útil para delimitar el espacio poroso y la masa basal (agregados y raíces) (Figura 14b). En el segundo componente solo con aproximadamente el 2% de la información muestra las coloraciones distintivas de las raíces señaladas en la Figura 14c (flechas amarillas). Así al momento de realizar la clasificación no supervisada y obtener las diferentes categorías, las imágenes de los componentes por separado sirvieron para diferenciar entre agregados y raíces del suelo.

Este tipo de técnicas han sido implementadas en la teledetección y análisis de imágenes satelitales para delimitar áreas de interés (Rodarmel y Shan, 2002), en el campo de la medicina para delimitar agentes patógenos o deformaciones en imágenes (Fernández-Arjona *et al.*, 2017; Omucheni *et al.*, 2014) y por supuesto en el campo de la edafología para cuantificar los diferentes componentes órgano-minerales del suelo (Terribile and Fitzpatrick 1995).

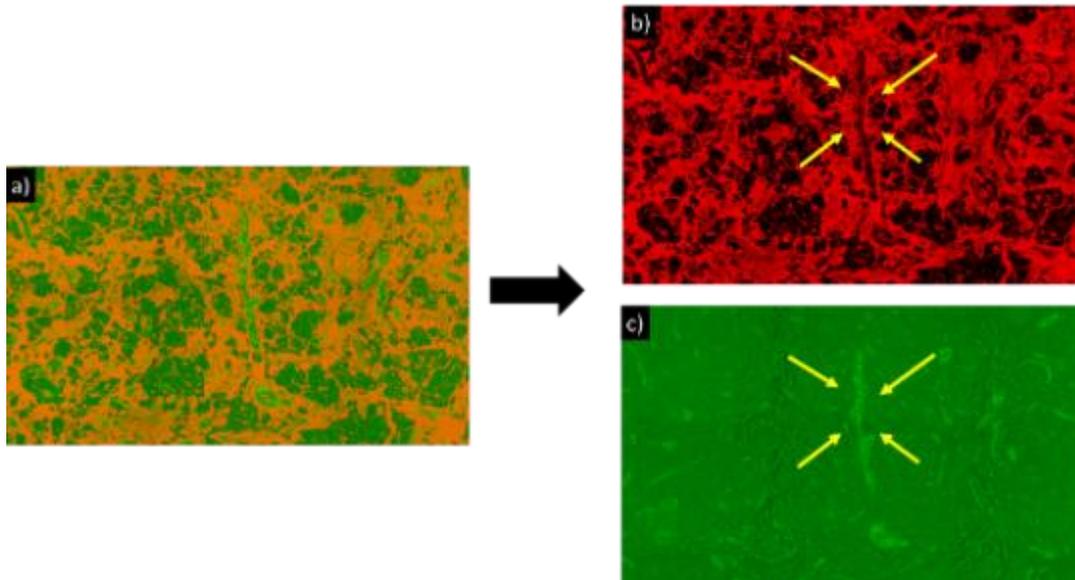


Figura 14. Imágenes en falso color correspondientes al análisis de componentes principales realizados a los mosaicos de alta resolución, donde se muestran el primero y segundo componentes principales (a), el primer componente (b) y el segundo componente (c).

Producción y descomposición de raíces

Las tasas de productividad y mortalidad relativa de las raíces obtenidas con los núcleos de crecimiento interno concuerdan con las del análisis de imágenes efectuado en los mosaicos de alta resolución. Los valores encontrados son estadísticamente similares en los monocultivos en ambos suelos y en la rotación de los Inceptisols. El único tratamiento que fue disímil fue el de rotación en Vertisols que presentó las mayores tasas y parámetros radicales los cuales se encuentran en el rango de los reportados con anterioridad por (Steingrobe *et al.*, 2000; Mu *et al.*, 2016).

La literatura indica que los aumentos en la producción y mortalidad de las raíces está dada por diversos factores donde los más importantes son la temperatura, la cantidad de agua en el suelo y una adecuada estructura del suelo (Gill y Jackson 2000; Silver y Miya 2001; Zhang *et al.*, 2008). Los aumentos registrados en el tratamiento diferente a los demás fueron causados por la implementación de la rotación de cultivos, la cual mejora la estructura del suelo al incorporar MO de la descomposición de raíces de cultivos anteriores. Asimismo, expande la zona de enraizamiento mejorando la estabilidad de los agregados y los sumideros de C orgánico (Linh *et al.*, 2015), disminuye el número y magnitud de grietas en Vertisols (López-Bellido *et al.*, 2016), mejora la retención de agua (Bhagat y Verma, 1991) e incrementa infiltración (Chilundo *et al.*, 2017).

Además, los contenidos de humedad >30% registrados mensualmente permitieron que las mejoras atribuidas a la rotación continuaran y que las raíces se pudieran desarrollar de manera

adecuada (Coulombe *et al.*, 1996). Estos valores coinciden con las constantes de plasticidad de Attemberg dentro de los límites de friable y plástico, dichos límites evitan los colapsos de estructura causados por los movimientos de expansión y contracción Hirekurubar *et al.*, 1991 (Bravo-Garza *et al.*, 2010)

Influencia de las raíces sobre la porosidad y agregación

La influencia de las raíces sobre la agregación y porosidad del suelo fue escasa o casi nula en los Inceptisols, debido a su corta productividad, causando la formación de macroagregados en mayor proporción que microagregados. Esto se debe a que los procesos físicos dominan a los procesos biológicos que son menores o nulos (Bravo-Garza *et al.*, 2010). En todo el ciclo de cultivo se observaron mayormente raíces muy descompuestas dentro de los macroagregados que proveen materia orgánica particulada lo cual brinda una mayor estabilidad a los agregados de mayor tamaño al actual como un agente cementante (Bravo-Garza *et al.*, 2010).

En el caso de los Vertisols se observó la transformación de las raíces en todo el ciclo de cultivo y la influencia que ejercen sobre la estabilidad de los agregados al descomponerse. La acción de las raíces sobre la agregación es primeramente la de reorientar las partículas del suelo y romper los macroagregados (Figura 9), resultados que coinciden con los reportados por Dorioz *et al.* (1993). Las raíces entran por las fisuras planares de los macroagregados disminuyendo su proporción e incrementando a los microagregados (Six *et al.*, 2004). Estos últimos sólo son propensos a colapsar con los ciclos de humedecimiento y secado del suelo. No obstante, el tratamiento con la rotación de cultivo permitió el desarrollo y la continuidad de algunos microagregados promoviendo una distribución uniforme de todas las categorías de agregados.

Conforme avanzó el ciclo de cultivo, las raíces comenzaron a descomponerse entrando a la categoría de muy descompuestas, las cuales funcionan como una fuente de C que promueve la actividad biológica y con ello la formación de macroagregados estables (Totsche *et al.*, 2017). Al avanzar en su estado de descomposición, es suposible pensar que la relación C:N disminuye haciendo a estos fragmentos más susceptibles para la actividad de los microorganismos del suelo (Struecker *et al.*, 2016), donde se han reportado el aumento en la actividad de las enzimas responsables del ciclo del C en la rizosfera del maíz (Razavi *et al.*, 2016).

Al final del cultivo la actividad biológica disminuyó y la escasa presencia de raíces hizo que el factor principal de formación de agregados fueran los procesos físicos de expansión-compactación: Sin embargo, en el caso del tratamiento de rotación en el Vertisols estos procesos ejercieron una mínima influencia gracias a sus altos contenidos de humedad que ofrecen condiciones favorables para la presencia de macro y microagregados estables.

CONCLUSIONES

El análisis espacial implementado permitió delimitar y cuantificar la presencia de raíces en diferentes estados de descomposición, su distribución en el total de una sección delgada y la relación que guardan con la formación de diferentes clases de tamaños de agregados y la porosidad del suelo.

Las raíces encontraron una mejor estructura para su crecimiento en los Vertisols debido a la baja densidad aparente registrada; mientras que la descomposición fue mayor a causa de los altos contenidos de humedad. Asimismo, la rotación de los cultivos magnifica de manera considerable estos resultados tres veces mayores, modificando la distribución de los agregados en el suelo (haciéndola más uniforme) y manteniendo la porosidad.

La dinámica de la formación y transformación de los agregados durante un ciclo de cultivo fue monitoreada con la ayuda de la combinación de técnicas: núcleos de crecimiento interno y análisis de imágenes en mosaicos de alta resolución. En este sentido es evidente que los procesos de agregación en los suelos arcillosos son cíclicos debido a las prácticas de labranza que rompen la estructura del suelo en cada ciclo. No obstante, el tipo de manejo agronómico puede incrementar la resiliencia del suelo al incorporar MO producto de la descomposición de las raíces y esta a su vez forme agregados estables que soporten el colapso de los procesos de humedecimiento y secado.

El análisis digital de mosaicos de alta resolución mediante transformación de análisis de componentes principales y clasificación no supervisada facilitan la delimitación de las raíces del suelo en diferentes estados de descomposición. Asimismo, con esta técnica es posible generar observaciones a diferentes escalas del proceso de agregación del suelo y como la descomposición de las raíces es un factor determinante en la microestructura del suelo.

LITERATURA CITADA

- Adderley, W.P., Simpson, I.A. & Davidson, D.A. 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*, **108**, 181–195.
- Aydemir, S., Keskin, S., & Drees, L.R. 2004. Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques. *Geoderma* **119**, 1–8.
- Bhagat, R.M., and T.S. Verma. 1991. Impact of rice straw management on soil physical properties and wheat yield. *Soil Sciences*, **152**,108-115.
- Bravo-garza, M.R., Voroney, P., & Bryan, R.B. 2010. Soil Biology & Biochemistry Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of 14 C-labeled maize residues, wetting, and drying cycles in vertisols. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**, 953–959.
- Bronick, C.J. & Lal, R., 2005. Soil structure and management : a review. *Geoderma*, **124**, 3–22.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T. & Babel, U. 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. *Waine Research Publications*, 605 Wolverhampton, UK.

- Campbell, J. 1996. Introduction to remote sensing. New York, New York: The Guilford Press. pp.287 - 92.
- Cheng W., Kuzyakov Y., 2005. Root effects on soil organic matter decomposition. In: S. Wright, S., Zobel, R. (Eds.), *Roots and Soil Management: Interactions between roots and the Soil, Agronomy Monograph No. 48, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin, USA, pp. 119-143.
- Coulombe, C.E., Wilding, L.P. & Dixon, J.B. 1996. Overview of vertisols : characteristics and impacts on society. *Advances in Agronomy*, **57**, 289-375.
- De León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M.C.A. & Castillo-Juárez, H. 2007. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil. *Geoderma*, **142**, 308–317.
- Dorioz, J.M., Robert, M. & Chenu, C. 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma* **56**, 179–194.
- Fernández-Arjona, M.M., Grondona, J.M., Granados-durán, P., Fernández-Ilebrez, P., López-ávalos, M.D., 2017. Microglia Morphological Categorization in a Rat Model of Neuroinflammation by Hierarchical Cluster and Principal Components Analysis. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, **11**, 1–22.
- Gale, W.J., Cambardella, C.A. & Bailey, T.B. 2000. Root-Derived Carbon and the Formation and Stabilization of Aggregates. *Soil Science Society American Journal*, **64**, 201-207.
- Gill, R. and R.B. Jackson. 2000. Global Patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytology*, **81**:275-280.
- Graaff, M. De, Six, J., Jastrow, J.D., Schadt, C.W. & Wulschleger, S.D. 2013. Soil Biology and Biochemistry Variation in root architecture among switchgrass cultivars impacts root decomposition rates. *Soil Biology and Biochemistry*, **58**, 198–206.
- Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., Vargas, T.G., Bontemps, L.C., Martínez, J.D., Méndez, E.S. & Solorio-Ortíz, C.A. 2016. Micromapping of microbial hotspots and bio films from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, **279**, 11–21.
- Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V. Gonzalez-Vargas, T., Solorio-Ortíz, C.A., Suástegui Méndez, E.S, Cajuste Bontemps, L., Rodríguez Mendoza, M.N. 2018. Thematic micro-maps of soil components using high-resolution mosaics from whole soil thin sections and image analysis. *European Journal of Soil Science. In press*.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2016. Censo de Población y vivienda 2010. Mapa digital de México V6.1. Consultado en marzo de 2016. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>.
- Keyes, S.D., Gillard, F., Soper, N., Mavrogordato, M.N., Sinclair, I. & Roose, T. 2016. Mapping soil deformation around plant roots using in vivo 4D X-ray Computed Tomography and Digital Volume Correlation. *Journal of Biomechanics*, **49**, 1802–1811.
- Kodešová, R., Kodeš, V., Žigová, A. & Šimůnek, J. 2006. Impact of plant roots and soil organisms on soil micromorphology and hydraulic properties. *Biologia*, **19**, 339–343.
- Linh, T.B., Sleutel, S., Vo Thi, G., Le Van, K., & Cornelis, W.M. 2015. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture. *Soil Tillage and Research*, **154**, 44–52.
- Manly, B.F. & Alberto, J.A.N. 2016. Multivariate Statistical Methods: A Primer. Fourth ed. 103-119pp. *CRC Press*. USA.
- Martínez, E., Fuentes, J.P., Silva, P., Valle, S., Acevedo, E. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in Mediterranean environment of Chile. *Soil Tillage & Research*. **99**: 234-244.
- Moran, C.J., Pierret, A. & Stevenson, A.W. 2000. X-ray absorption and phase contrast imaging to study the interplay between plant roots and soil structure. *Plant and Soil*, **223**, 99–115.
- Mu, X., Zhao, Y., Liu, K., Ji, B., Guo, H., Xue, Z. & Li, C. 2016. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, **78**, 32–43.
- Murphy, C.P. 1986. Thin Section Preparation of Soils and Sediments. *AB Academic*. Berkhamsted, UK, 149 pp.
- Ng, S.C. 2017. Principal component analysis to reduce dimension on digital image. *Procedia Computer Science*. **111**: 113-119.
- Nunan, N., Wu, K., Young, I.M., Crawford, J.W., Ritz, K., 2003. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil. *FEMS Microbiology Ecology*, **44**, 203–215.
- Omucheni, D.L., Kaduki, K.A., Bulimo, W.D. & Angeyo, H.K. 2014. Application of principal component analysis to multispectral-multimodal optical image analysis for malaria diagnostics. *Malaria Journal*, **13**, 485.
- Pape, Th. y D. Legger. 1995. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Poch, R.M. & Virto, I. 2014. Micromorphology techniques for soil organic carbon studies. In: Soil Carbon, Progress in Soil Science (eds A.E. Hartemink & K. McSweeney), pp. 17-26. *Springer International Publishing*, Switzerland.

- Poch, R.M. 2015. Descripción de láminas delgadas de suelos y sedimentos. In: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 309-320. Fondo Editorial Pascual Bravo, Colombia.
- Protz, R. & VandenBygaart, A.J., 1998. Towards systematic image analysis in the study of soil micromorphology. *Sciences of Soils*, **3**, 34–44.
- Puentes, R., Wilding, L.P. & Drees, L.R. 1992. Microspatial variability and sampling concepts in soil porosity studies of vertisols. *Geoderma*, **53**, 373–385.
- Rodarmel, C., and Shan J. 2002. Principal component analysis for hyperspectral image classification. *Survey and Land Information Science*. 62: 115-123.
- Rasa, K., Eickhorst, T., Tippkötter, R. & Yli-halla, M. 2012. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma*, **173–174**, 10–18.
- Razavi, B.S., Zarebanadkouki, M., Blagodatskaya, E. & Kuzyakov, Y. 2016. Rhizosphere shape of lentil and maize: Spatial distribution of enzyme activities. *Environmental Modelling and Software*, **79**, 229–237.
- Sauzet, O., Cammas, C., Marc, J., Bajard, M. & Montagne, D. 2017. Geoderma Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections. *Geoderma*, **292**, 135–148.
- Silver, W.L. & Miya, R.K. 2001. Global patterns in root decomposition : comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, **209**, 407–419.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, **79**, 7-31.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation : a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, **32**, 2099–2103.
- Steingrobe, B., Schmid, H., Claassen, N., 2001a. The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops – influence of soil and root disturbance during installation of the bags on root ingrowth into the cores. *Journal of Soil Science & Soil Nutrition*, **15**, 143–151.
- Steingrobe, B., Schmid, H., Gutser, R., 2001b. Root production and root mortality of winter wheat grown on sandy and loamy soils in different farming systems. *Plant & Soil*, **237**, 239-248.
- Steingrobe, B., Schmid, H., Claassen, N., 2000. The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops influence of soil conditions inside the ingrowth core on root growth. *Biology and Fertility of Soils*, **33**, 331–339.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. *Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin, USA.
- Stoops, G. 2015. Composición de la masa basal y de los edaforrasgos. In: Manual de 675 micromorfología de suelos y técnicas complementarias (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 309-320. Fondo Editorial Pascual Bravo, Colombia.
- Struecker, J., Kaiser, M., Dyckmans, J. & George, R. 2016. Maize root decomposition in subsoil horizons of two silt loams differing in soil organic C accumulation due to colluvial processes. *Geoderma*, **283**, 101–109.
- Terribile, F. & FitzPatrick, E.A. 1992. The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections. *Geoderma*, **55**, 159–174.
- Terribile, F. & Fitzpatrick, E.A. 1995. The application of some image- analysis techniques to recognition of soil micromorphological features. *European Journal of Soil Science*, **46**, 29-45.
- Torres-Guerrero, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ortíz-Solorio, C.A., Herrera, J.M. y Gutiérrez-Castorena, E.V. Etcheveres Barra, J.D. 2016. Descomposición de raíces de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes clases de tierra. *Agrociencia in press*.
- Totsche, K.U., Amelung, W., Gerzabek, M.H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehdorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Prechtel, A., Ray, N., Kögel-Knabner, I., 2017. Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 1–33.
- Van Reewijk, L. P. 1993. Procedures for Soil Analysis. Technical paper n° 9. 4th Edition. *ISRIC*. Wageningen, Netherlands.
- van Noordwijk, M.G., H. Brouwer, F.W. Koning, W. Meijboom and W.Grzebisz. 1994. Production and decay of structural root material of winter wheat and sugar beet in conventional and integrated cropping systems. *Agricultural Ecosystems & Environment*, **51**, 99-113.
- Zaiets, O. & Poch, R.M., 2016. Micromorphology of organic matter and humus in Mediterranean mountain soils. *Geoderma*, **272**, 83–92.
- Zarnes, S.C., Allett, P.D.H., Engough, A.G.B. & Oung, I.M.Y. 2000. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, **51**, 435-443
- Zhang, D.Q., Hui, D.F., Luo, Y.Q. & Zhou, G.Y. 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*, **1**, 85–93.

CAPÍTULO IV

CUANTIFICACIÓN DE LA POROSIDAD, AGREGADOS Y RAÍCES EN SECCIONES DELGADAS DE SUELO: MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN *VERSUS* IMÁGENES AISLADAS

CUANTIFICACIÓN DE LA POROSIDAD, AGREGADOS Y RAÍCES EN SECCIONES DELGADAS DE SUELO: MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN *VERSUS* IMÁGENES AISLADAS
QUANTIFICATION OF POROSITY, AGGREGATES AND ROOTS IN SOIL THIN SECTIONS: HIGH RESOLUTION MOSAICS *VERSUS* ISOLATED IMAGES

Carlos Alberto Torres-Guerrero¹, Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena¹, Carlos Alberto Ortiz Solorio¹, Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena²

¹ Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

²Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León.

[†]Autor de correspondencia

RESUMEN

Los cambios en la estructura del suelo pueden ser monitoreados en muestras de suelo inalterado a través del análisis micromorfométrico de secciones delgadas. No obstante, tal metodología emplea fotografías aisladas que no son capaces de relacionarse en diferentes escalas entre componentes del suelo y perdiendo representatividad, a menos que se emplee un número considerable de imágenes (más de 10). La solución a este problema es el uso de mosaicos de alta resolución (2 nm pixel⁻¹) que cubren toda la sección delgada y son capaces de aislar y cuantificar los distintos componentes del suelo en un mismo proceso. El objetivo de esta investigación fue comparar los resultados de las cuantificaciones de poros, agregados y raíces resultantes en mosaicos de alta resolución y fotografías aisladas. 16 secciones delgadas con un área de 1865 mm² colectadas en Vertisols e Inceptisols, con dos manejos agronómicos: monocultivo de maíz o rotación maíz-avena fueron seleccionadas. 49 imágenes secuenciales fueron tomadas con un microscopio petrográfico a 2× y con luz polarizada plana (PPL). De esas imágenes se seleccionaron 3 y 5 de manera aleatoria. Los mosaicos fueron transformados mediante componentes principales en ArcGis[®] y los componentes del suelo delimitados de acuerdo con los valores de sus varianzas; mientras que las imágenes aisladas fueron segmentadas y los componentes del suelo cuantificados. Los resultados indican que la cuantificación de componentes del suelo usando imágenes individuales genera valores con alta desviación estándar (hasta 20%), sobre todo cuando el suelo presenta alta heterogeneidad con respecto a la porosidad total; además, no se pueden relacionar los componentes del suelo en distintas escalas (por ejemplo, macroagregados y raíces). En cambio, los mosaicos de alta

resolución ofrecen la cuantificación total de la sección delgada y componentes del suelo pueden ser agrupados en clases o categorías para observar intra o inter relaciones en el sistema suelo.

Palabras clave: *análisis de imágenes, segmentación, manejo agronómico, componentes del suelo, transformación de componentes principales.*

INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo es uno de los indicadores de calidad más importantes para evaluar la productividad, sustentabilidad o degradación de los sistemas de producción agrícola. Para cuantificar los cambios estructurales debidos al manejo agronómico se han incluido un conjunto de datos básicos donde sobresalen la estabilidad de agregados y la porosidad del suelo (Pagliai y Vignozzi, 2002; Allen *et al.*, 2011). La estabilidad de agregados (resistencia de los agregados a disgregarse debido a fuerzas externas como la precipitación o labranza) se determina por una serie de propiedades químicas, biológicas, además de su manejo agronómico (Six *et al.*, 2004; Totsche *et al.*, 2017). Esta propiedad es un indicador importante del almacén de C orgánico y de la actividad de raíces y comunidades microbianas en el suelo (Rimal y Lal, 2009). La porosidad del suelo, por su parte, es una propiedad ampliamente reconocida como el mejor indicador de la calidad de la estructura del suelo. La cuantificación del espacio poroso en términos de forma, tamaño, continuidad, orientación y disposición de los poros permite definir la complejidad de la estructura del suelo y comprender sus modificaciones inducidas por la actividad antropogénica (Pagliai y Vignozzi, 2002). La caracterización del sistema de poros proporciona una base realista para entender la retención y el movimiento del agua en el suelo (Shipitalo y Protz, 1987; Reynolds *et al.*, 2009).

Las cuantificaciones de estas propiedades del suelo se han realizado a través de metodologías convencionales. En el caso de la estabilidad de los agregados las diferentes técnicas empleadas en seco o en húmedo representan cierta artificialidad, ya que es necesario en algunos casos el uso de disgregantes y eliminación de partículas de cierto tamaño (Douglas *et al.*, 1982; Kemper y Rosenau, 1986; Le Bissonnais, 1996); además, los resultados que se obtienen no son equivalentes entre técnicas, y si bien están relacionados entre sí, en general tienden a dar mayor importancia a alguno de los mecanismos individuales de desagregación (Gabidoud *et al.*, 2011). Con respecto a la porosidad, los datos se obtienen de manera indirecta y directa. La primera se realiza utilizando los valores de densidad aparente y real (Flint y Flint, 2002) o a través de la conductividad hidráulica (Danielson y Sutherland, 1986). La manera

directa es mediante la intrusión de mercurio; sin embargo, es un agente tóxico que lo convierte en un método riesgoso (Piglai y De Nobili, 1993).

El análisis micromorfológico de secciones delgadas ha servido como una alternativa viable para la cuantificación de la porosidad y los agregados del suelo (Stoops, 2015) ya que puede incorporar análisis de contexturas, formas, distribución y continuidad que aportan información detallada de la forma y distribución de poros y agregados del suelo (Gutiérrez y Mejía, 2015; Poch, 2015). Además, con el procesamiento digital de imágenes (segmentaciones comúnmente) se ha cuantificado el sistema poroso (Protz *et al.*, 1992; Protz y Vanden-Bygaart, 1998), inclusive es posible obtener la varianza que representan dichas imágenes en la totalidad de la sección delgada (Pineda-Marín *et al.*, 2012). No obstante, este análisis está limitado debido a que la porosidad se analiza a través de imágenes aisladas, las cuales son seleccionadas de manera aleatoria. Un problema con estas imágenes es que pueden exhibir baja representatividad a causa de que las microfotografías constituyen áreas pequeñas que impiden la correlación de los componentes del suelo entre diferentes escalas. Otros autores utilizan imágenes de toda la sección delgada obtenidas a través de scanner, para tener una idea global de la porosidad, pero son de baja resolución espacial, causando pérdida de información en escalas pequeñas (Bullock y Murphy, 1980; Protz y Vanden-Bygaart, 1998).

La solución a este problema son los mosaicos de alta resolución (200 nm pixel⁻¹), que cubren toda la sección delgada, y pueden ser examinados con los algoritmos usados en el análisis espacial para delimitar y cuantificar los diferentes componentes del suelo (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016, 2018) y que están relacionados directamente con la porosidad y agregación como son las raíces (Zhang y Wang, 2015). La hipótesis de esta investigación es que con el uso de mosaicos de alta resolución es posible obtener datos de todo el universo (sección delgada) al cuantificar los diferentes componentes del suelo (porosidad, agregados y raíces) y estos son diferentes estadísticamente a los resultados obtenidos a través del análisis usando imágenes aisladas.

El objetivo fue comparar la cuantificación de los componentes del suelo (poros, agregados y raíces) obtenidos con mosaicos de alta resolución e imágenes individuales (tres y cinco) aisladas de la sección delgada del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio fue realizado en el ejido de Vega de Madero, Hidalgo, México dentro de las coordenadas 19°58'-19°59' N y 99°25'- 99°27' O (Figura 1) y con una elevación de 2350 msnm. Su clima es templado semi-húmedo con lluvias en verano, con una precipitación total anual promedio de 892 mm y una temperatura media anual de 12 °C. La vegetación es inducida en su totalidad y comprende cultivos de maíz forrajero, frijol y avena (INEGI, 2016).

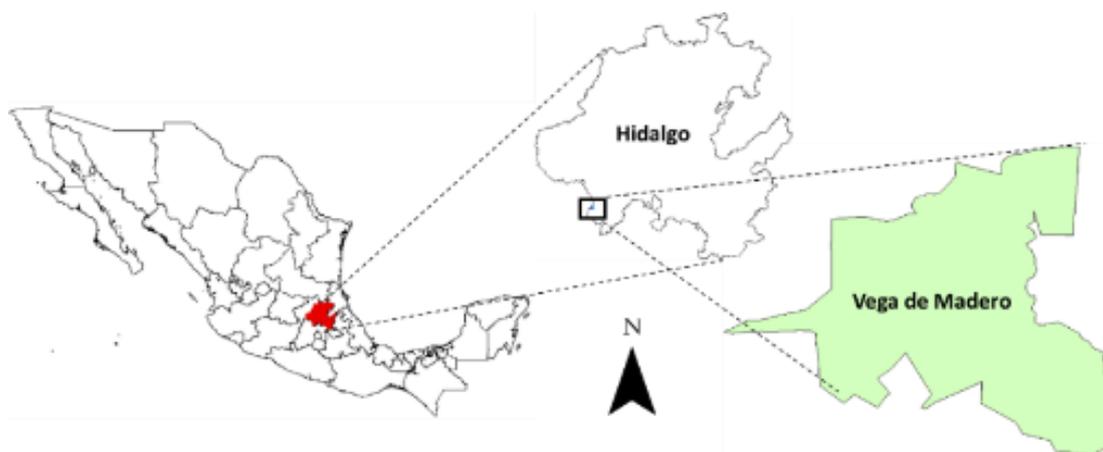


Figura 1. Localización del ejido Vega de Madero, Hidalgo en el territorio nacional.

En el ejido se presentan suelos con altos contenidos de arcilla: Inceptisols (*Typic Dystrustepts*) y Vertisols (*Udic Haplausterts*) según el levantamiento edafológico realizado por Torres-Guerrero *et al.* (2017) y su uso principal es agrícola, por lo cual las parcelas cuentan con un sistema de riego por canales y una presa derivadora, la cual abastece a la comunidad para el riego inicial (antes de la siembra) y el resto del ciclo los cultivos son de temporal.

Trabajo de campo

Dentro del ejido fueron seleccionadas cuatro parcelas representativas del manejo agronómico de la región, en donde los factores de variación fueron: el suelo (Vertisols o Inceptisols) y el tipo manejo agronómico: monocultivo de maíz o rotación maíz avena, teniendo un total de cuatro tratamientos de acuerdo con las combinaciones de suelo y manejo. En estos sitios se colectaron muestras inalteradas de suelo mensualmente (agosto a noviembre) en cajas tipo Kubiena durante el ciclo del cultivo de maíz, las cuales se emplearon para elaborar un total de 16 secciones delgadas (cuatro por tratamiento).

Elaboración de secciones delgadas

Las muestras inalteradas fueron secadas al aire y a la sombra para su posterior impregnación con resina poliéster y monoestireno en una relación 3:1. La elaboración de las secciones delgadas de suelo ($5 \times 7 \text{ cm} \times 30 \mu\text{m}$) se llevó a cabo de acuerdo con Murphy (1986) y los componentes del suelo (porosidad, agregados, raíces) se describieron utilizando la terminología propuesta por Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003).

Adquisición de Imágenes

En cada sección delgada se tomaron 49 imágenes de manera secuencial utilizando una cámara digital Canon Rebel T3i (resolución de 12.2 Megapíxeles), acoplada a un microscopio petrográfico Olympus BX51, utilizando en objetivo $2\times$ y luz polarizada plana (LPP). Cada imagen fue capturada en el formato original de la cámara *.CR2 y transformada a formato TIF. La resolución de cada imagen fue de 4290×2856 píxeles ($0.0026 \text{ mm pixel}^{-1}$) y una profundidad de color de 24 bits ($8 \text{ bits} \times 3 \text{ bandas}$ en estándar RGB).

Elaboración de los mosaicos

Los mosaicos de alta resolución se construyeron de acuerdo con la técnica propuesta por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016; 2018). Cada mosaico se integró por 7×7 imágenes, con un área total de 1865 mm^2 .

Análisis digital de imágenes

Cuantificación de componentes del suelo en imágenes aisladas. De las imágenes secuenciales tomadas para los mosaicos se eligieron tres y cinco imágenes por tratamiento de forma aleatoria y que no pertenecieran a los bordes de la sección delgada para evitar la sobrestimación del espacio poroso.

Las imágenes fueron sometidas a un proceso de transformación de tres bandas roja, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés) con una profundidad de color de 24 bits a imágenes en escala de grises (binarias de 8 bits) para el análisis de porosidad y agregados. A cada una de las imágenes binarizadas se le practicó una segmentación a través del comando *ISO cluster unsupervised* dentro del software ArcGis 10.3[®], dando como resultado una capa ráster con 30 categorías divididas con base a sus valores de saturación de grises. Con ayuda de la imagen original las categorías fueron reclasificadas en dos capas ráster: espacio poroso y agregados, las cuales posteriormente fueron vectorizadas y cuantificadas (Figura 2).

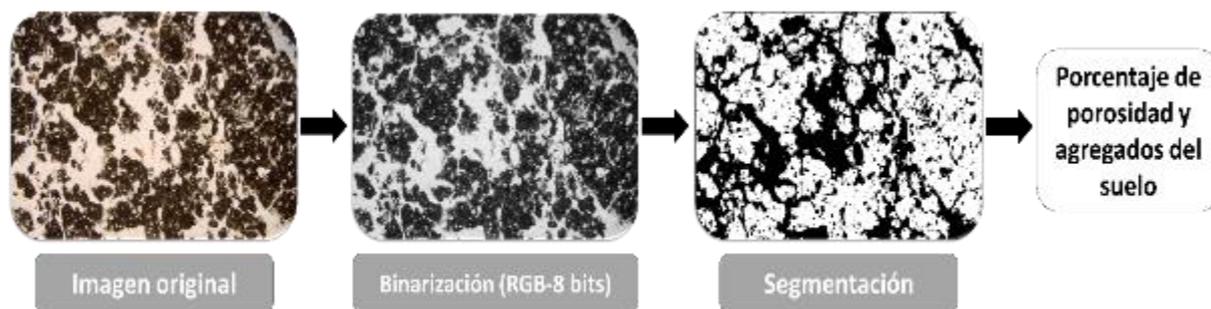


Figura 2. Proceso para la cuantificación del porcentaje de espacio poroso y agregados del suelo en imágenes aisladas de las secciones delgadas a una magnificación de 2x.

En el caso de las raíces se practicó la segmentación a las imágenes originales (RGB de 24 bits), en donde la segmentación fue por medio de sus valores de saturación de color rojo, azul y verde (RGB). En este caso sólo la categoría perteneciente a las raíces fue extraída y vectorizada para su cuantificación.

Cuantificación de componentes en mosaicos de alta resolución. La delimitación y cuantificación de los componentes del suelo se llevó a cabo utilizando ArcGis® 10.3. Inicialmente se realizó una transformación de componentes principales (ACP) a las imágenes de tres capas para reducir la información a dos capas o componentes principales (que representa el >98% de la información de la imagen original) y elimina los cálculos redundantes debido a la composición de múltiples imágenes de los mosaicos (Terribile y Fitzpatrick, 1992; Campbell, 1996). Al finalizar este procedimiento las dos capas resultantes de cada mosaico muestran las varianzas representativas de cada componente del suelo. Así pues, se realizó una reclasificación con la ayuda de la imagen original (color verdadero) y los dos componentes principales, los cuales se visualizaron utilizando falsos colores para facilitar la separación de componentes. Con este proceso se delimitaron los agregados, raíces y espacio poroso en capas ráster y después fueron vectorizadas para su cuantificación final.

En el caso de los agregados, los vectores resultantes de cada mosaico se utilizaron para cuantificar y dividir los agregados en cinco clases: I) microagregados (<250 μm o 8,180 píxeles), II) macroagregados muy finos (250-500 μm o 8180-29,254 píxeles), III) finos (500-1000 μm o 29254-117,164 píxeles), IV) medios (1000-5000 μm o 117,164-3,272,000 píxeles) y V) gruesos (>5000 μm o 3,272,000 píxeles) utilizando la propuesta de Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018).

RESULTADOS

Porosidad y agregados

La porosidad calculada en la totalidad de los mosaicos varió de 42.93 hasta 55.05% en los Inceptisols. La mayor variación a lo largo del cultivo se registró en el monocultivo en los meses de agosto y octubre (>10%); mientras que en la rotación la variación no superó el 5%. Estos resultados son estadísticamente iguales a los obtenidos de las imágenes aisladas de acuerdo con su desviación estándar (Cuadro 1). Además, la prevalencia de poros fisura dominó a lo largo del cultivo y sólo en al inicio y final de la rotación (agosto y noviembre) se pudieron observar poros de empaquetamiento compuesto.

Cuadro 1. Porosidad del suelo calculado a lo largo del ciclo de cultivo 2015 con técnicas convencionales (imágenes aisladas) y con mosaicos de alta resolución compuestos de imágenes secuenciales en los diferentes tratamientos.

Método	Porcentaje de porosidad (%)							
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
	<i>Typic Dystrustepts (Inceptisol)</i>							
	<i>Monocultivo</i>				<i>Rotación</i>			
Tres fotos	53 ± 5.98 [†]	50 ± 6.21	47 ± 4.85 [†]	43 ± 6.68	53 ± 4.16 [†]	49 ± 11.20 [†]	53 ± 7.03 [†]	54 ± 6.41 [†]
Cinco fotos	50 ± 4.35 [†]	48 ± 5.02	48 ± 3.78 [†]	46 ± 3.98	51 ± 5.10 [†]	49 ± 10.83 [†]	53 ± 6.86 [†]	53 ± 3.02 [†]
Mosaico	53.40	42.93	46.21	55.05	54.69	50.90	51.83	56.17
	<i>Udic Haplaustepts (Vertisol)</i>							
	<i>Monocultivo</i>				<i>Rotación</i>			
Tres fotos	51 ± 6.02	47 ± 9.61	47 ± 2.56	39 ± 5.90	55 ± 2.89 [†]	59 ± 8.41	48 ± 2.09	45 ± 5.90
Cinco fotos	51 ± 5.17	47 ± 8.66	49 ± 1.85	48 ± 4.42	41 ± 2.43 [†]	57 ± 7.66	50 ± 1.94	48 ± 4.01
Mosaico	66.67	56.04	57.22	43.82	55.04	50.03	53.46	53.41

[†]Estadísticamente iguales de acuerdo a su varianza (±)

En los Vertisols, la variación de la porosidad fue >20% en el monocultivo y <5% en la rotación. No obstante, ninguno de los valores de las medias calculados en las imágenes aisladas (tres y cinco) resultó similar a los calculados en los mosaicos, a excepción del mes de agosto en la rotación, por lo que más de la mitad de las desviaciones estándar fueron >5%. En cuanto a la forma de los poros en el monocultivo se observó un mayor número de poros de empaquetamiento compuesto (Figura 3a) en el primer mes, disminuyendo al final del cultivo y aumentando los poros fisura; mientras que en la rotación la dominancia la tuvieron los poros de empaquetamiento compuesto y en menor cantidad las fisuras (Figura 4a).

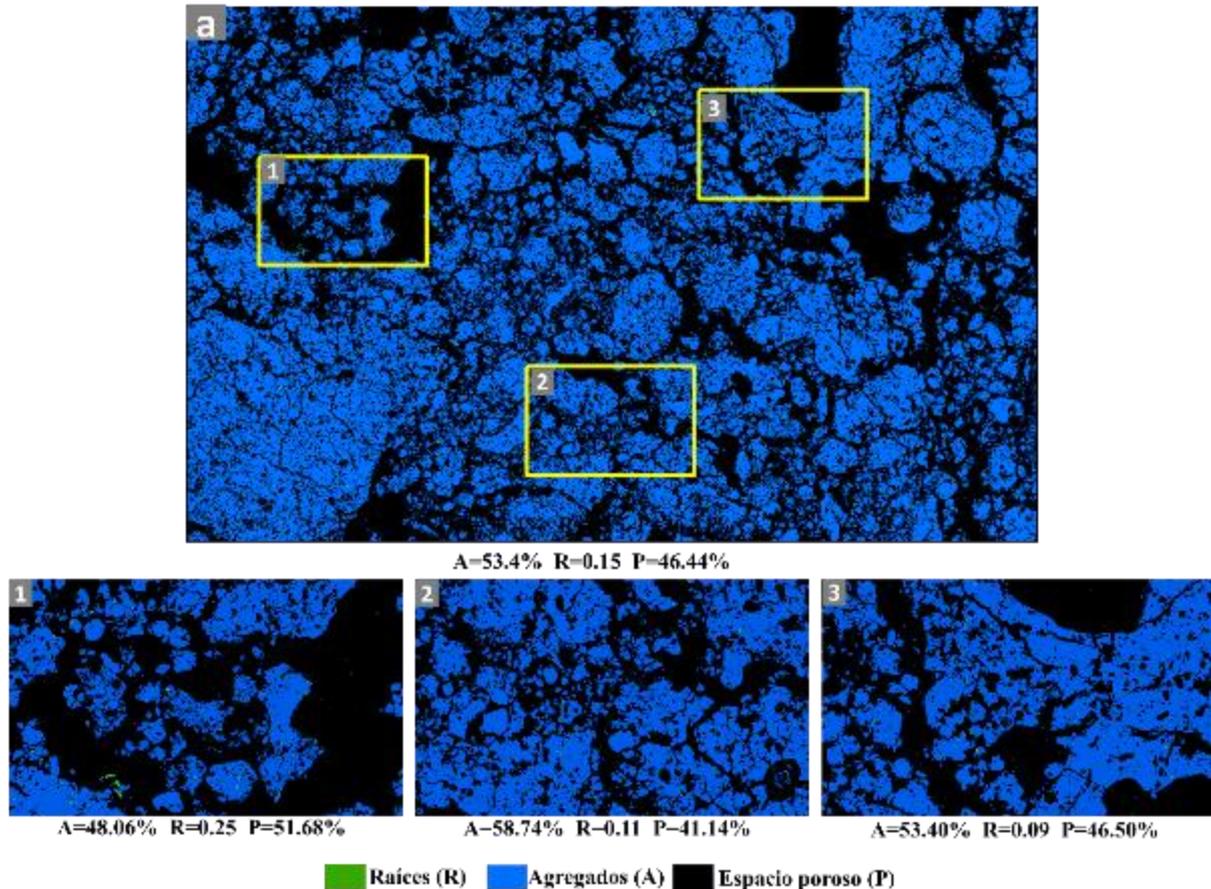


Figura 3. Cuantificación de los componentes del suelo en el mosaico de alta resolución (a) y en tres imágenes aisladas para el tratamiento de monocultivo en Inceptisol en el mes de agosto. Se observa que la sección delgada presenta gran variabilidad en la distribución de poros y agregados del suelo y una escasa presencia de raíces provocando diferencias abruptas entre la cuantificación de imágenes. Longitud del mosaico (a) 54.17 mm y de las fotografías aisladas (1 a 3) 8.32 mm.

La cuantificación en las imágenes aisladas en los agregados siguió una tendencia similar a la porosidad, ya que se calcularon con la diferencia de 100% que representa la imagen menos el porcentaje de poros, por lo que sus desviaciones estándar son iguales. Los agregados al igual que en la porosidad presentaron desviaciones estándar mayores en los Inceptisols que en los Vertisols, lo que permitió que las medias calculadas arrojaran similitud estadística. Pese a este resultado, en todos los tratamientos se observó un decremento de 2% en las desviaciones estándar al aumentar el número de imágenes analizadas (de tres a cinco) a causa de la alta variabilidad de los dos órdenes de suelo presentes (Figuras 3 y 4).

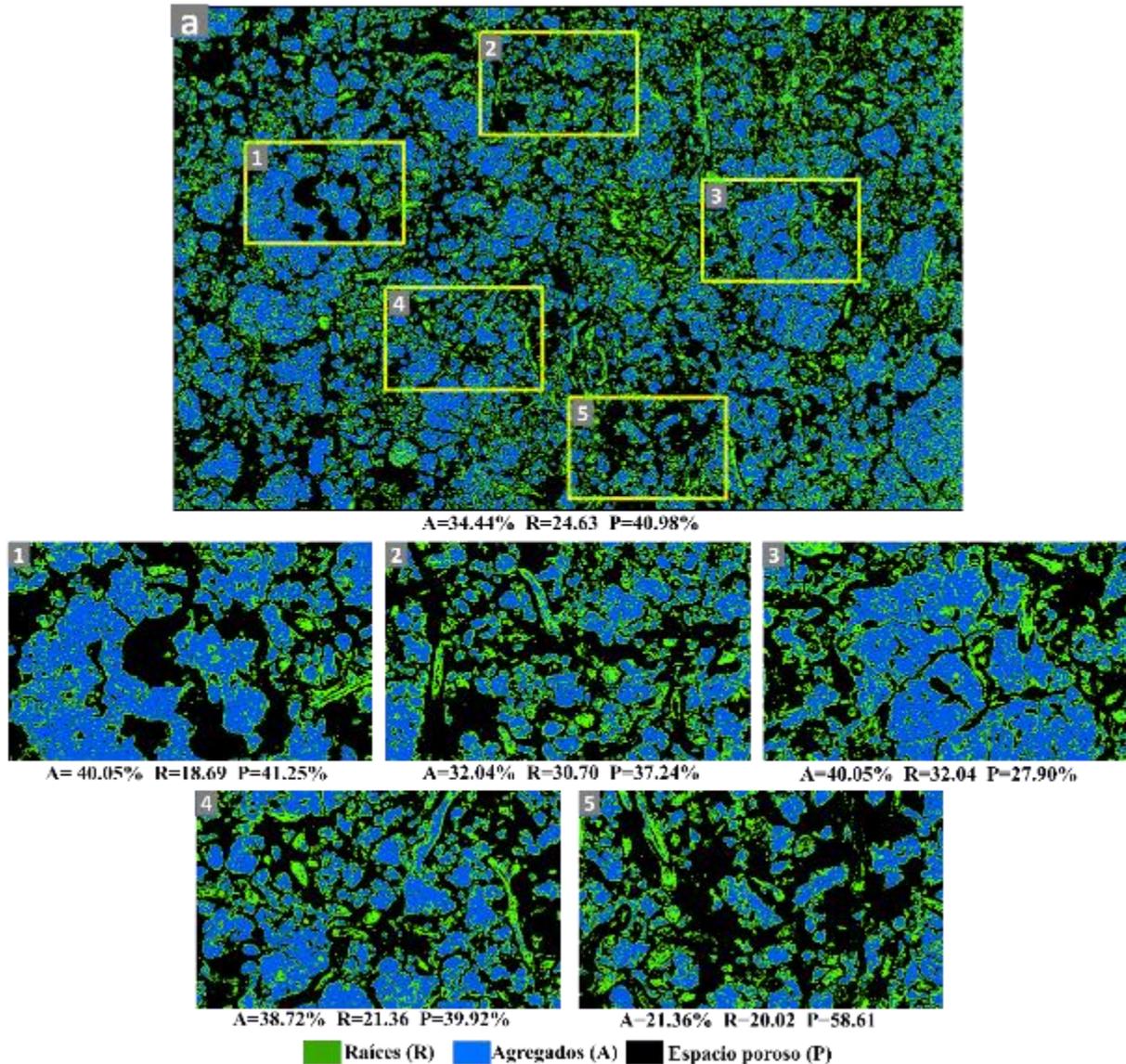


Figura 4. Distribución de agregados, poros y raíces en un mosaico de alta resolución (a) y cinco imágenes aisladas en el tratamiento con mayor cantidad de raíces (Vertisol + rotación) durante el mes de agosto. Al aumentar el número de fotografías analizadas la desviación estándar disminuye, aunque los suelos contienen una gran heterogeneidad mostrando aun diferencias entre la media de las imágenes y los mosaicos. Longitud del mosaico (a) 54.17 mm y de las fotografías aisladas (1 a 5) 8.32 mm.

En el caso de los agregados en los mosaicos, la separación en categorías de diferentes tamaños facilitó observar la distribución en diferentes clases de tamaños a lo largo del ciclo del cultivo (Figura 5), así como el tipo de agregados dominantes en cada sección delgada.

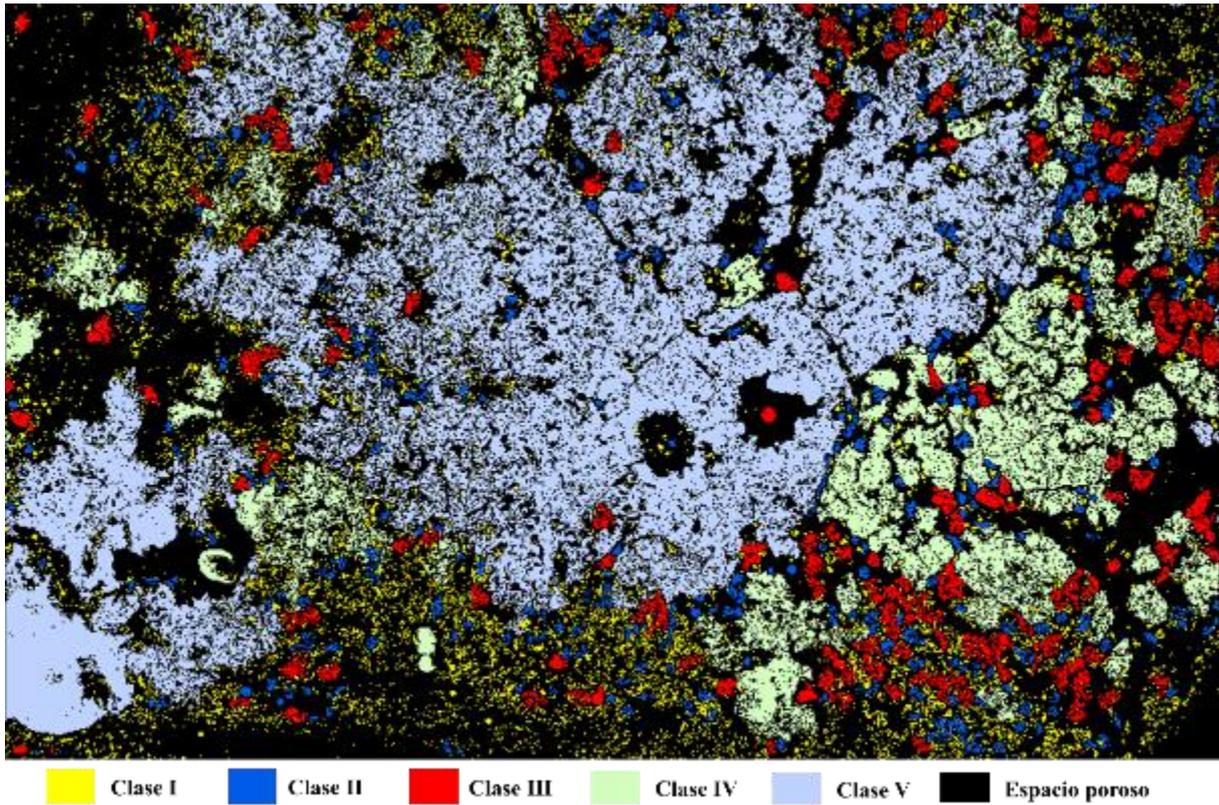


Figura 3. Distribución por clases de agregados en un mosaico de alta resolución correspondiente al tratamiento de Vertisol y rotación de cultivo en el mes octubre. La estructura del suelo puede ser visualizada y correlacionada con otros componentes del suelo en la totalidad de la sección delgada. Longitud del marco 54.17 mm. Clase I microagregados (<250 μm), clase II) macroagregados muy finos (250-500 μm), clase III) finos (500-1000 μm), clase IV) medios (1000-5000 μm) y V) gruesos (>5000 μm)

En Inceptisols, dominan los bloques subangulares de mayor tamaño (categorías IV y V) en monocultivo y rotación, con una proporción mínima agregados granulares; mientras que en Vertisols los resultados son similares, pero sólo en el monocultivo. Ya que, en la rotación de cultivos la distribución de agregados al inicio y final fue uniforme entre las diferentes categorías, y sólo se presentaron cambios en la etapa intermedia y dominaron los agregados de categoría IV y V (Cuadro 2). En cuanto a la forma de los agregados, la mayor proporción en el ciclo de cultivo fue granular por efecto de las raíces (Pape y Lager, 1995), y sólo hasta que estas últimas disminuyeron se presentaron bloques subangulares.

Cuadro 2. Porcentaje de agregados del suelo calculados en las fotografías aisladas y la su distribución obtenida en los mosaicos de alta resolución. Los agregados del suelo fueron divididos en diferentes categorías de acuerdo a su tamaño.

Método	Porcentaje de agregados (%)							
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
<i>Fotos aisladas</i>								
<i>Typic Dystrustepts (Inceptisol)</i>								
	<i>Monocultivo</i>				<i>Rotación</i>			
Tres	46 [†]	49	53 [†]	54 [†]	46.91 [†]	50.73 [†]	46.29 [†]	45.51 [†]
Cinco	48 [†]	53 [†]	53 [†]	56 [†]	42.91 [†]	40.74 [†]	51.16 [†]	54.57 [†]
<i>Udic Haplausterts (Vertisol)</i>								
Tres	47.08	51.84	51.96	54.42	22.37 [†]	37.63	36.06	46.48 [†]
Cinco	46.05	52.53	50.96	51.42	34.48	30.54	39.97 [†]	51.52
<i>Mosaicos</i>								
<i>Typic Dystrustepts (Inceptisol)</i>								
Categoría	<i>Monocultivo</i>				<i>Rotación</i>			
I	4.05	1.79	2.78	3.83	4	4.4	2.81	2.31
II	2.61	0.89	1.12	1.6	2.04	1.59	1.05	1.08
III	4.99	1.58	2.23	2.99	4.55	2.6	2.26	2.48
IV	20.88	4.29	6.22	9.49	16.4	7.68	8.85	13.09
V	16.07	48.21	41.06	26.72	16.81	31.88	32.91	24.7
Total	48.6	56.76	53.41	44.63	43.8	48.15	47.88	43.66
<i>Udic Haplausterts (Vertisol)</i>								
I	3.27	2.15	5.06	2.14	I 8.11	4.33	5.22	6.76
II	3.75	1.27	2.17	1.31	II 3.49	1.71	2	3.92
III	7.29	2.19	3.06	2.43	III 6.39	2.31	3.03	8.21
IV	15.17	5.14	7.7	9.00	IV 5.85	3	7.7	21.88
V	0	33.05	24.49	40.87	V 0	30.02	20.49	5.42
Total	29.48	43.8	42.48	55.75	0	23.84	41.37	38.44

[†] Estadísticamente iguales de acuerdo a su varianza (\pm)

Categorías I) microagregados (<250 μ m), macroagregados II) muy finos (250-500 μ m), III) finos (500-1000 μ m), IV) medios (1000-5000 μ m) y V) gruesos (>5000 μ m).

Raíces

La proporción de raíces obtenida en la totalidad de las secciones delgadas difirió ampliamente con las proporciones calculadas con tres y cinco imágenes aleatorias, ya que sólo 25% del total de los casos correspondió con los mosaicos. Además, las desviaciones estándar de la mitad de los registros fueron mayores a 50% del valor de la media. El único tratamiento que obtuvo la mayor cantidad de raíces fue el Vertisol con la rotación de cultivos, en donde al inicio del cultivo las raíces ocuparon 21.12 y terminaron en 0.04%. Estos valores resultaron ser hasta seis veces mayores que los demás tratamientos ensayados (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cuantificación de raíces en dos suelos durante el ciclo de cultivo 2015, calculados en fotografías aisladas (tres y cinco) y mosaicos de alta resolución en secciones delgadas de suelo.

Método	Porcentaje de raíces (%)							
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
	<i>Typic Dystrustepts (Inceptisol)</i>							
	<i>Monocultivo</i>				<i>Rotación</i>			
Tres fotos	1.12 ± 0.56	0.58 ± 0.30 [†]	0.41 ± 0.04	0.2 ± 0.10	0.09 ± 0.07	0.27 ± 0.14	0.71 ± 0.15	0.49 ± 0.12
Cinco fotos	1.17 ± 0.41	0.98 ± 0.83 [†]	0.41 ± 0.02	0.16 ± 0.13	0.09 ± 0.05	0.26 ± 0.10	0.84 ± 0.38	0.43 ± 0.12
Mosaico	0.15	0.31	0.38	0.32	1.11	0.95	0.29	0.17
	<i>Udic Haplausterts (Vertisol)</i>							
	<i>Monocultivo</i>				<i>Rotación</i>			
Tres fotos	2.92 ± 0.38	0.16 ± 0.09 [†]	0.04 ± 0.03	0.58 ± 0.11	26.63 ± 2.00	13.37 ± 5.40 [†]	10.94 ± 5.69 [†]	0.52 ± 0.08
Cinco fotos	2.95 ± 0.49	0.47 ± 0.45	0.04 ± 0.03	0.58 ± 0.11	24.63 ± 2.42	12.46 ± 5.61 [†]	10.03 ± 5.48 [†]	0.48 ± 0.08 [†]
Mosaico	3.85	0.16	0.3	0.43	21.12	8.1	8.1	0.4

[†]Estadísticamente iguales de acuerdo a su varianza (±)10

DISCUSIÓN

A pesar de que el análisis de microfotografías aisladas es una técnica sencilla y de las más empleadas para la cuantificación de componentes del suelo de secciones delgadas, los valores que se producen tienen alta variabilidad en las medias (con altas desviaciones estándar) y genera sobre o subestimaciones (hasta de 20%) dependiendo del tipo de suelo. En esta investigación se demostró que la prevalencia raíces en Vertisols desarrolla una estructura heterogénea conformada por agregados granulares y poros de empaquetamiento compuesto, generados por la actividad biológica (Six *et al.*, 2004). Sin la presencia de raíces, el suelo es más homogéneo y sólo ocurren fisuras y bloques subangulares en donde sólo dominan los procesos físicos de humedecimiento y secado característicos de suelos arcillosos (Coulombe *et al.*, 1996). Además, la heterogeneidad de los Vertisols es generada en un sistema de rotación de cultivos; mientras que la homogeneidad dominan en los monocultivos donde se reduce la actividad biológica (Murphy y Banfield, 1978).

Con el fin de reducir la heterogeneidad en los análisis micromorfológicos, varios investigadores proponen utilizar cajas tipo Kubiena para coleccionar muestras inalteradas (Grossman, 1964; Milfred *et al.*, 1967) y posteriormente, a nivel de sección delgada analizar un mayor número de imágenes (Murphy y Banfield, 1978; Shipitalo y Protz, 1987). Incluso el conteo de puntos para cuantificar cada componente del suelo puede ser de 300 (Bullock *et al.*, 1985) incluso hasta 6000 (Murphy, 1983) o bien utilizar bloques de mayor tamaño 25×25 para aumentar la exactitud y precisión de los datos (Puentes *et al.*, 1992).

En esta investigación se demuestra que la cuantificación de poros y agregados en imágenes

aisladas genera una aproximación de los valores reales en la sección delgada sólo cuando el número de componentes del suelo son pocos (agregados/poros) y los agregados tienen el mismo color y forma como en Inceptisols. Sin embargo, cuando se incorpora un componente más, en este caso las raíces, los valores de imágenes aisladas distaron considerablemente de la cuantificación total (en los mosaicos). En este sentido, los mosaicos y el procesamiento digital de imágenes permiten cuantificar la totalidad de los componentes del suelo y los resultados pueden ser uniformizados y reproducidos por cualquier usuario. Además, resuelve el problema de representatividad reportado por Marcelino *et al.* (2007) y se pueden aislar, cuantificar y generar clases por ejemplo agregados, a diferencia de las imágenes segmentadas o binarizadas que proponen varios autores (Moran, 1993; Ringrose-Voase, 1996; Poch, 2015).

Un mayor número de imágenes puede reducir la desviación estándar entre 1 y 3% de las cuantificaciones en agregados y poros (Cuadro 1 y 2), y hasta 0.05% en las raíces (Cuadro 3), por lo que se puede sugerir como un método estadísticamente confiable, si el objetivo de la investigación es cuantificar el espacio poroso y la masa basal de una sección delgada. Sin embargo, si la finalidad de los estudios es demostrar diferentes procesos, relaciones o distribuciones de edaforrasgos dentro de una sección delgada, el uso de mosaicos de alta resolución es una mejor alternativa (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018). En este sentido las raíces pueden ser aisladas, cuantificados y relacionados con los diferentes tamaños de agregados y poros del suelo (Torres *et al.*, 2017), a diferencia de estudios anteriores en donde se intentaba relacionar a las raíces con la microestructura (Moran *et al.* 2000), la porosidad (Kodešová *et al.*, 2006) o la formación de agregados del suelo (De León-González *et al.*, 2007) en áreas muy pequeñas o con imágenes de baja resolución.

Finalmente, con esta metodología también es posible implementar análisis cuantitativos que comprendan uno o varios componentes del suelo, por lo que proporciona un medio de descripción e interpretación adicional a los estudios convencionales, al correlacionar espacialmente dichos rasgos en áreas completas de secciones delgadas (Adderley *et al.*, 2002). Además, se pueden interrelacionar elementos que no siempre coinciden en escala como es el caso de las bacterias con los agregados del suelo y los componentes minerales (Nunan *et al.*, 2003; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016) o los revestimientos arcillosos con la macro y microporosidad (Sauzet *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

La cuantificación de los componentes del suelo a través de imágenes aisladas resulta ser un método poco confiable con variabilidad >10% al evaluar poros y agregados en más de la mitad de los casos evaluados y hasta 20% cuando se analizan las raíces.

La metodología de imágenes aisladas no es recomendable, ya que los dos órdenes de suelo muestran diferente variabilidad tanto en distribución de sus componentes como en las características visuales (color), por lo que, el número de imágenes necesarias para obtener cuantificaciones estadísticamente representativas es variable.

La técnica convencional proporciona resultados que no pueden ser relacionados entre componentes del suelo que tengan diferentes escalas (por ejemplo, macroagregados).

Los mosaicos de alta resolución son una alternativa no sólo para cuantificar la porosidad, agregados o raíces; sino además se pueden evaluar sus distribuciones y relaciones entre los diferentes componentes del suelo. En ese sentido, la metodología propuesta ofrece cuantificaciones totales que pueden abarcar áreas en donde se desee monitorear los diferentes procesos y transformaciones del suelo.

LITERATURA CITADA

- Adderley, W.P., Simpson, I.A. & Davidson, D.A. 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*. 108: 181–195.
- Allen, D.E., Singh, B.P. and Dalal, R.C. 2011. Soil Health Indicators Under Climate Change: A Review of Current Knowledge. *In: Singh, B.P. Cowie, A.L. and Yin Chan, A. (eds) Soil Health and Climate Change*. 29: 25–49. Springer, New York.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T. & Babel, U. 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. *Waine Research Publications*, 605 Wolverhampton, UK.
- Bullock, P., Murphy, C.P., 1980. Towards the quantification of soil structure. *Journal of Microscopy*. 120: 317–328.
- Campbell, J. 1996. Introduction to remote sensing. New York, New York: The Guilford Press. pp.287 - 92.
- Coulombe, C.E., Wilding, L.P. & Dixon, J.B. 1996. Overview of vertisols : characteristics and impacts on society. *Advances in Agronomy*, 57: 289-375.
- Danielson, R.E., and P.L. Sutherland. 1986. Porosity. p. 443–461. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- De León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M.C.A., Castillo-Juárez, H. 2007. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil. *Geoderma*. 142: 308–317.
- Douglas, JT & MJ Goss. 1982. Stability and organic matter of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil & Tillage Research*. 2: 155-175.
- Flint, L.E. and Flint, A.L. 2002. Porosity 241–254. *In Dane H., G.C. Topp (Eds.), Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods, ASA, Madison; SSSA pp. 229-240.
- Gabioud, A.E., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres ordenes de suelos. *Ciencia del suelo*. 29: 129–139.
- Grossman, R.B., 1964. Composite thin sections for estimation of clay film volume. *Soil Science Society of America*. 28: 132-133.
- Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., Vargas, T.G., Bontemps, L.C., Martínez, J.D., Méndez, E.S. & Solorio-Ortíz, C.A. 2016. Micromapping of microbial hotspots and bio films from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, 279: 11–21.

- Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V. Gonzalez-Vargas, T., Solorio-Ortíz, C.A., Suástegui Méndez, E.S, Cajuste Bontemps, L., Rodríguez Mendoza, M.N. 2018. Thematic micro-maps of soil components using high-resolution mosaics from whole soil thin sections and image analysis. *European Journal of Soil Science*. In press.
- Gutiérrez C., V.R., y Mejía C., J.M. 2015. Caracterización de propiedades físicas de suelos mediante análisis de imágenes y simulación fluido-dinámica a escala de poro. In: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 353-383. Fondo Editorial Pascual Bravo, Colombia.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2016. Censo de Población y vivienda 2010. Mapa digital de México V6.1. Consultado en marzo de 2017. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>.
- Kemper, W., Rosenau, R., 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. *Methods Soil Anal. Part 1 - Phys. Mineral. Methods* 9: 425–442.
- Kodešová, R., Kodeš, V., Žigová, A. & Šimůnek, J. 2006. Impact of plant roots and soil organisms on soil micromorphology and hydraulic properties. *Biologia*. 19: 339–343.
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*. 47: 425–437.
- Milfred, C.J., Hole, F.D. and Torrie, J.H., 1967. Sampling for pedographic modal analysis of an argillic horizon. *Soil Science Society of America*. 31: 244-247.
- Moran, C.J., Pierret, A. & Stevenson, A.W. 2000. X-ray absorption and phase contrast imaging to study the interplay between plant roots and soil structure. *Plant and Soil*. 223: 99–115.
- Moran, C.J. 1993. Image processing and soil micromorphology. *Developments in Soil Science*. 22: 459-482.
- Murphy, C.P., 1983. Point counting pores and illuvial clay in thin section. *Geoderma*. 31: 133-150
- Murphy, C.P. 1986. Thin Section Preparation of Soils and Sediments. *AB Academic*. Berkhamsted, UK, 149 pp.
- Murphy, C.P., Banfield, C.F. 1978. Pore space variability in a sub- surface horizon of two soils. *Journal of Soil Science*. 29: 156–166.
- Nunan, N., Wu, K., Young, I.M., Crawford, J.W., Ritz, K., 2003. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil. *FEMS Microbiology Ecology*. 44: 203–215.
- Pagliai M., Vignozzi N. (2002) Image Analysis and Microscopic Techniques to Characterize Soil Pore System. In: Blahovec J., Kutflek M. (eds) *Physical Methods in Agriculture*. Springer, Boston, MA.
- Pape, Th. y D. Legger. 1995. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Piglai M, De Nobili M. 1993. Relationship between soil porosity and root development and soil enzyme activity in cultivated soils. *Geoderma*. 56:243–256
- Pineda-Marín, L., Gutiérrez-Castorena, M.C., Anicua-Sánchez, R., Cajuste-Bontemps, L., Gutiérrez-Castorena, E.V., 2012. Quantification of Porosity in Substrates Using Thin Sections and Image Analysis. *Acta Horticulture*. 947: 105–110.
- Poch, R.M. 2015. Micromorfometría. In: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementaria s (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 309-320. *Fondo Editorial Pascual Bravo*, Colombia.
- Puentes, R., Wilding, L.P., Drees, L.R., 1992. Microspatial variability and sampling concepts in soil porosity studies of vertisols. *Geoderma*. 53: 373–385.
- Protz, R. & VandenBygaart, A. 1998. Towards systematic image analysis in the study of soil micromorphology. *Sciences of Soils*. 3: 34
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*. 152: 252–263.
- Ringrose Voase. A.J. 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil*. 183: 27-47.
- Rimal BK, Lal R. 2009. Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*. 106: 62–70.
- Sauzet, O., Cammas, C., Marc, J., Bajard, M., Montagne, D., 2017. Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections. *Geoderma*. 292: 135–148.
- Shipitalo, M.J. and R. Protz. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science*. 67:445–456.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Deneff, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*. 79: 7–31.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*. 32: 2099–2103.

- Stoops, G. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. *Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin, USA.
- Stoops, G. 2015. Composición de la masa basal y de los edaforrasgos. In: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 309-320. Fondo Editorial Pascual Bravo, Colombia.
- Terribile, F., Fitzpatrick, E.A., 1992. The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections. *Geoderma*. 55: 159–174.
- Torres Guerrero, C.A., Gutiérrez Castorena, M.C., Herrera, J.M. Ortiz Solorio, C.A. y Gutiérrez Castorena, E.V. 2017. Descomposición de raíces de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes clases de tierra. *Agrociencia*. *In press*.
- Totsche, K.U., Amelung, W., Gerzabek, M.H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehndorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Prechtel, A., Ray, N., Kögel-Knabner, I., 2017. Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*. 1–33.
- Zhang, D.Q., Hui, D.F., Luo, Y.Q. & Zhou, G.Y. 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*. 1: 85–93.

CAPÍTULO V

CUANTIFICACIÓN DE RAÍCES EN SECCIONES DELGADAS DE SUELO USANDO ANÁLISIS DE IMÁGENES Y TRANSFORMACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES

CUANTIFICACIÓN DE RAÍCES EN SECCIONES DELGADAS DE SUELO USANDO ANÁLISIS DE IMÁGENES Y TRANSFORMACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES

ROOT QUANTIFICATION IN SOIL THIN SECTIONS USING IMAGE ANALYSIS AND PRINCIPAL COMPONENTS TRANSFORMATION

RESUMEN

La cuantificación de las raíces presentes en un horizonte determinado puede ser usada como un indicador de la calidad suelos agrícolas; sin embargo, las técnicas de análisis están limitadas por la artificialidad y baja representatividad. El procesamiento digital de imágenes en secciones delgadas de suelo es propuesto como una alternativa ya que, es capaz de delimitar, identificar y cuantificar las raíces y otros componentes del suelo. Esta investigación tiene por objetivo comparar la precisión de las clasificaciones supervisadas para delimitar las raíces y otros componentes del suelo de tres técnicas diferentes: 1) usando imágenes en un solo tipo de iluminación; 2) la combinación de tres tipos de luces en una sola imagen; y 3) la clasificación en imágenes procedentes de la transformación de componentes principales. Secciones delgadas de tres suelos diferentes (Entisol, Vertisol e Inceptisol) y bajo cultivo de maíz fueron seleccionadas para capturar imágenes donde previamente se localizarán raíces en diferentes estados de descomposición. Después, se capturaron imágenes con en los tres tipos de iluminación (luz polariza plana LPP, luz polarizada cruzada LPC y luz polarizada cruzada con compensador de yeso LPC λ). La combinación de imágenes se obtuvo con el software libre Fiji Image J. La transformación de componentes principales (TCP) se realizó en Erdas Imagine 2014® al igual que todas las clasificaciones supervisadas a través zonas donde se pusieron reconocer las raíces y otros componentes del suelo (campos de entrenamiento). Las clasificaciones en donde se usó la combinación de las tres luces entran en la categoría de aceptable (entre 0.6 y 0.8 en el índice de Kappa) para la concordancia entre la precisión del usuario y el productor debido a que no fue posible contrastar de manera adecuada los componentes del suelo; mientras que cuando se utilizó LPP y la transformación de componentes principales se obtuvo una concordancia casi perfecta en el índice de Kappa (>0.8). No obstante, al emplear la TCP las imágenes se redujeron en 50% sin perder información y las raíces pudieron ser delimitadas y cuantificadas en dos estados de descomposición (baja y moderada) gracias al uso de los dos componentes principales.

Palabras clave: *Precisión, índice de Kappa-Cohen, imágenes multicapa, dominio espectral.*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento y muerte de las raíces es un proceso importante que se encuentra relacionado con la transformación y evolución de la estructura en los suelos de interés agrícola; sin embargo, las metodologías disponibles para su análisis presentan limitantes como la artificialidad de los resultados (métodos no destructivos) o su poca continuidad y representatividad (métodos destructivos) (Silver y Miya, 2001; Zhang y Wang, 2015). El análisis de imágenes de las raíces en secciones delgadas de suelo puede ser la solución a dichos problemas, al ser capaz de delimitar y cuantificar la presencia de este componente del suelo al momento de ser tomada la muestra. Para su observación es necesario el uso de varios tipos de luces bajo el microscopio (LPP y LPC al menos) en las cuales se pueden reconocer diferentes estados de descomposición de acuerdo con la presencia de estructuras celulares reconocibles, birrefringencia, opacidad e isotropía (Bullock *et al.*, 1985; Stoops, 2003; Poch, 2015). La mayor parte de los estudios se han centrado en la estimación u observación de las raíces y sus interacciones con otros componentes del suelo (Noordwijk *et al.*, 1994; De León-González *et al.*, 2007; Zaiets y Poch, 2016) o bien se han cuantificado de manera automática con ayuda de procesos computacionales en algunas secciones delgadas de suelos (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018), pero no se han llevado a cabo un monitoreo del proceso de descomposición de las raíces.

La delimitación y cuantificación en microfotografías de secciones delgadas está limitada por el uso de técnicas cualitativas de observación (McBratney *et al.*, 2000), modelos cuantitativos erróneos (Poch, 2015; Zaiets y Poch, 2016) o métodos de clasificación y reconocimiento con baja precisión asociados con errores humanos (Duda *et al.*, 2001). En este sentido el procesamiento digital de imágenes puede acoplar algoritmos que permiten el reconocimiento de objetos con el uso de patrones, valores de brillantez o números digitales. Asimismo, la clasificación se ocupa de establecer criterios que son usados para identificar o distinguir los diferentes objetos en una imagen (en este caso los componentes del suelo); mientras que el reconocimiento es el proceso por el cual una serie de herramientas (patrones, números o características intrínsecas del objeto) son empleadas para encontrar un objeto en específico (Russ, 2011).

Uno de los métodos cuantitativos más utilizados en percepción remota es la clasificación supervisada la cual busca segmentar los diferentes dominios espectrales en regiones que puedan asociarse con clases (cobertura de suelo, áreas urbanas o componentes del suelo) de interés para una aplicación particular. En este sentido, la clasificación supervisada es el mapeo del espacio de medición (microfotografía) a través de los dominios espectrales conocidos por el clasificador

(campos de entrenamiento) y contrastarlos con la clasificación del software (Swain y Davis, 1978; Ma *et al.*, 2017). El algoritmo de máxima verosimilitud (maximum likelihood en inglés) es el que frecuentemente se utiliza en estas clasificaciones y numéricamente trata de encontrar un valor o estimador lo más próximo al valor original en una función de distribución desconocida (Richards, 2013). El resultado de la clasificación puede ser condensado en matrices de confusión entre las diferentes categorías, en donde se puede implementar un análisis estadístico para medir la precisión de las clasificaciones como el índice de Kappa Cohen (Bishop *et al.*, 1975; Richards, 2013).

Un problema relacionado con la clasificación supervisada en microfotografías de secciones delgadas es que se obtienen imágenes multicapa con profundidad de color de 24 bits (8 bits \times 3 bandas de color RGB) (Terribile and FitzPatrick, 1992; Adderley *et al.*, 2002), que sumadas a la alta resolución actual de las cámaras fotográficas (>20 Megapíxeles) y la magnificación del microscopio, se pueden obtener imágenes de gran tamaño (> 40 Mb) que pueden presentar dificultades para su procesamiento, almacenamiento y tráfico en ordenadores convencionales (Ng, 2017). La transformación de componentes principales (TCP) permite reducir el tamaño de las imágenes a partir del cálculo de la matriz inversa de los diferentes valores de saturación de color (RGB). El resultado es una nueva imagen o imágenes (componentes), que representa nuevas combinaciones lineales de los dominios espectrales en orden decreciente de importancia de acuerdo con sus varianzas (Mackiewicz y Ratajczak, 1993). De esta manera, la TCP puede servir para reducir el número de características que se deben procesar al clasificar los datos de una imagen debido a sus propiedades de compresión y su finalidad es retener sólo las bandas de alta varianza para el posterior análisis cuantitativo (Richards, 2013). Además, la TCP ha sido utilizada para aminorar el ruido en imágenes multi-espectrales, mejorar la definición de las áreas de traslape (Lee *et al.*, 1990) y el desarrollo de falsos colores útiles para la clasificación o delimitación de áreas poco correlacionadas dentro de una imagen o una sección delgada de suelo (Terribile y Fitzpatrick, 1995; Richards, 2013).

La combinación de la TCP y la clasificación supervisada facilitan el procesamiento y reconocimiento de las raíces en el suelo, en adición con el uso de imágenes en diferentes tipos de luces como: luz polarizada plana (LPP), polarizada cruzada (LPX) y polarizada cruzada con polarizador de yeso (LPX λ) que permiten la visualización de las propiedades de las raíces con las cuales el analizador experto es capaz de determinar diferentes grados de descomposición. Por lo que al realizar una rutina en donde se empleen dichos procedimientos se obtienen clasificaciones con una mayor precisión que cuando se emplean por separado; asimismo, la

TCP reduce los volúmenes de información para el procesamiento imágenes multi-capa sin afectar la precisión de las clasificaciones.

Los objetivos de esta investigación son: comparar la precisión global (P.G.) y del usuario (P.U.) de la clasificación supervisada elaborada en imágenes con una sola luz (LPP), la combinación de tres fuentes de iluminación (LPP, LPX y LPX λ , mediante algebra de mapas) y con transformación de componentes principales de los tres tipos de iluminación; y la obtención de mapas temáticos de las raíces en diferentes grados de descomposición en tres unidades de suelo diferentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y elaboración de secciones delgadas de suelo

Para esta investigación fueron seleccionadas tres secciones delgadas provenientes de cultivos de maíz, las cuales fueron tomadas dentro de la zona de influencia radical de las plantas en la etapa vegetativa del cultivo (donde hay mayor producción de raíces) a una profundidad de 9 cm. Las secciones corresponden a tres unidades de suelo: *Typic Ustifluvents*, *Udic Haplausterts* y *Typic Distrustepts* con diferentes contenidos de arcilla (37, 57 y 59 %, respectivamente).

La elaboración de las secciones delgadas de suelo (5 ×7 cm ×30 μ m) se llevó a cabo de acuerdo con Murphy (1986) y se describieron utilizando la terminología propuesta por Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003).

Adquisición de las imágenes

En cada sección delgada se seleccionó un campo en donde se localizarán raíces que evidenciarán diferentes estados de descomposición. Posteriormente, se procedió a capturar las microfotografías utilizando una cámara digital (Canon Rebel T3, 12.2 Megapixels) acoplada a un microscopio petrográfico Olympus BX51 y una magnificación de 2 \times . En cada campo seleccionado se capturaron tres fotografías en diferentes tipos de iluminación: luz polarizada plana (LPP), luz polarizada cruzada (LPX) y luz polarizada cruzada con compensador de yeso (LPX λ).

Procesamiento previo de las imágenes

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando la metodología de Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016 y 2018). Cada imagen capturada en el formato original de la cámara

*.CR2 fue transformada al formato IMG en el software ArcGis v. 10.3 (Environmental Systems Research Institute, 2015; Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA). La resolución de cada imagen es de 4290×2856 píxeles con una profundidad de color de 24 bits ($8 \text{ bits} \times 3 \text{ bandas}$ en estándar RGB). Las imágenes fueron redimensionadas a $11.19 \times 7.46 \text{ mm}$ para corresponder al tamaño real de la magnificación en el microscopio, dando como resultado que cada píxel tuviera un área de $0.0026 \text{ mm}^2 \text{ píxel}^{-1}$. Todas las imágenes fueron sometidas a un balanceo de color en el software Erdas Imagine 2014 (Hexagon Geospatial, 2014; Hexagon Geospatial, Norcross, GA, USA) para asegurar que la distribución de los colores fuera uniforme en las tres bandas (RGB) y evitar complicaciones al momento de realizar las clasificaciones supervisadas.

Delimitación y cuantificación de las raíces

Los componentes del suelo fueron definidos como clases o rasgos de interés (FOI, por sus siglas en inglés) y se identificaron visualmente en el microscopio de acuerdo con los criterios establecidos por Bullock *et al.* (1985) Stoops (2003). Para la delimitación de los componentes microfotografías se realizaron clasificaciones supervisadas empleando áreas de entrenamiento de acuerdo con la metodología propuesta por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018). Según el conocimiento del micromorfólogo (usuario clasificador) se dibujaron polígonos para obtener el dominio espectral o valores de brillantez RGB correspondiente a cada FOI y posteriormente realizar la clasificación usando el algoritmo de máxima verosimilitud (maximum likelihood) en los tres procedimientos ensayados:

Clasificación en un solo tipo de iluminación. En este caso se emplearon las microfotografías capturadas en LPP. En estas imágenes fueron delimitados los poros, materia orgánica fina amorfa (MOFA), agregados y las raíces. Para cada FOI se utilizaron 15 campos de entrenamiento a excepción de las raíces en las cuales se dibujaron 30 campos. Una vez obtenida la clasificación, los píxeles clasificados como raíces se extrajeron de la imagen para ser vectorizados y cuantificados en cada unidad de suelo.

Clasificación en tres tipos de iluminación usando algebra de mapas. Las imágenes con los tres tipos de iluminación fueron sometidas a operaciones aritméticas dentro del software Fiji de Image J (Schindelin *et al.*, 2012) y obtener la combinación que maximizara la máxima birrefringencia, redujera la opacidad del espacio poroso y aumentara el contraste de los agregados. Las operaciones ejecutadas fueron las propuestas por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018) en donde proponen clases de materiales orgánicos en diferentes grados de descomposición. Las áreas de entrenamiento usadas fueron 30 para el caso de las raíces y 15

por cada componente del suelo; aunque en estas imágenes fue posible identificar a los minerales como otra FOI.

Para cuantificar las raíces los píxeles correspondientes a esta categoría fueron vectorizados y en los diferentes estados de descomposición se usaron los criterios de presencia de estructura celular y birrefringencia e acuerdo con Bullock *et al.* (1985). Este proceso se realizó a través de la extracción de píxeles con el mayor grado de brillantez de la imagen en LPX, luego fueron superpuestos en los polígonos correspondientes a raíces y se llevó a cabo un corte de polígonos (comando clip en ArcGis v. 10.3). Los polígonos superpuestos en las raíces representan el grado de descomposición bajo; mientras que los no superpuestos representa la descomposición moderada.

Clasificación en imágenes con transformación de componentes principales. Previo a la clasificación, las tres imágenes (tres bandas cada una) de cada unidad de suelo fueron sometidas a la transformación de componentes principales en Erdas Imagine 2014. El cálculo de los componentes se basó en el análisis de las nueve bandas. Posteriormente, se utilizó el componente con el mayor porcentaje de información para realizar la clasificación supervisada. La imagen obtenida se usó para la clasificación supervisada, pero en este caso los dominios espectrales se trabajaron en escala de grises. Se empleó el mismo número de áreas de entrenamiento que en los procedimientos anteriores. El componente dos se usó para extraer los valores de máxima brillantez, los cuales se superpusieron en los polígonos clasificados como raíces obteniendo las categorías de baja y moderada descomposición.

Medición de la precisión de las clasificaciones

Las diferentes clasificaciones fueron evaluadas en Erdas Imagine 2014 con el cálculo de las matrices de error. En estas matrices se obtiene la comparación entre la clasificación del usuario o el micromorfólogo (filas) y la clasificación predicha por el software (columnas). Asimismo, el índice de Kappa-Cohen se calculó para medir la concordancia entre la clasificación del micromorfólogo y la del análisis de imagen (software), en donde los valores cercanos a 1 representan la mayor concordancia (Manly y Navarro Alberto, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un solo tipo de iluminación (LPP)

Al emplear un solo tipo de iluminación (LPP) para realizar las clasificaciones supervisadas, la precisión global (P.G.) en las tres unidades de suelo estudiadas fue de 97, 94 y 82% en

Entisol, Vertisol e Inceptisol, respectivamente. Además, el índice de Kappa Cohen registró casi perfecta concordancia entre el análisis de imagen y el micromorfólogo en Entisol (0.9) y Vertisol (0.85) según el criterio de Manly y Navarro Alberto (2016); mientras que en el Inceptisol la concordancia fue sólo de 0.7 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Matrices de confusión, cálculo de la precisión global y del usuario y valores de brillantez (dominio espectral) de los componentes del suelo en las clasificaciones supervisadas en imágenes con un solo tipo de iluminación (LPP).

Usuario	Clasificación software					P.U. (%)	P.S. (%)	P.G. (%)	K	Dominios espectrales			C.T. (%)
	MOFA	Agregados	Raíces	Poros	Total					R	G	B	
1. Entisol (Typic Ustifluvents)													
MOFA	631	229	0	0	860	28	96			0-156	0-32	23-60	5
Agregados	29	10900	474	3	11406	98	96			109-145	46-99	39-106	24
Raíces	0	202	10377	3284	13863	69	94	97	0.90**	119-209	101-193	95-200	43
Poros	0	0	235	102191	102426	100	97			187-212	197-210	196-215	28
Total	660	11331	11086	105478	128555								
2. Vertisol (Udic Haplausterts)													
MOFA	1157	3037	7	0	4201	28	88			41-48	42-53	43-51	9
Agregados	157	16022	212	0	16391	98	82	94	0.85*	26-72	27-65	37-64	21
Raíces	0	429	12407	5091	17927	69	98			83-183	84-172	43-158	31
Poros	0	0	0	103161	103161	100	95			150-199	154-206	154-208	39
Total	1314	19488	12626	108252	141680								
3. Inceptisol (Typic Dystrustepts)													
MOFA	1681	9727	0	0	11408	15	92			15-58	28-58	39-62	20
Agregados	142	14722	657	4	15525	95	46			49-151	51-142	49-130	33
Raíces	0	7069	10271	1159	18499	56	93	82	0.70*	146-194	109-191	103-186	22
Poros	0	2	43	58606	58651	100	98			205-209	204-208	210-212	25
Total	1823	31520	10971	59769	104083								

MOFA, Materia orgánica fina amorfa; P.U. precisión del usuario (micromorfólogo); P.G. Precisión global; P.S. Precisión del software; C.T., Cuantificación total.

** , Concordancia casi perfecta en índice de Kappa; * , concordancia considerable de índice de Kappa. Criterio según Richards (2013).

Los valores de P.U. mostraron una gran correlación con los de P.S. en Entisol y Vertisol para los poros y agregados (>95%); mientras que para las raíces y la MOFA la P.U. registró los valores más bajos en estos dos suelos (hasta 28%). Los errores de clasificación del usuario presentaron la misma precisión para MOFA (28%) y raíces (69%). En los Inceptisols, los errores en la clasificación pueden ser atribuidos a que los campos de entrenamiento utilizados para clasificar a la MOFA no llegaron a la ausencia de color (0-0-0 RGB); mientras que para el Vertisol ocurrió el caso contrario ya que por condiciones pedogenéticas este tipo de suelo registra comúnmente coloraciones negras que pueden ser confundidas con las propiedades isotrópicas de la MOFA (Coulumbe *et al.*, 2000). En el caso de las raíces los dominios espectrales de la periferia fueron confundidos o cuantificados como poros en ambos suelos. Finalmente, en el Inceptisol, la P.U. se redujo hasta 15% para MOFA y 56% en las raíces a

causa de la gran homogeneidad registrada en la imagen, por lo que sólo las FOI más contrastantes se pudieron clasificar de manera satisfactoria (Figura 1).

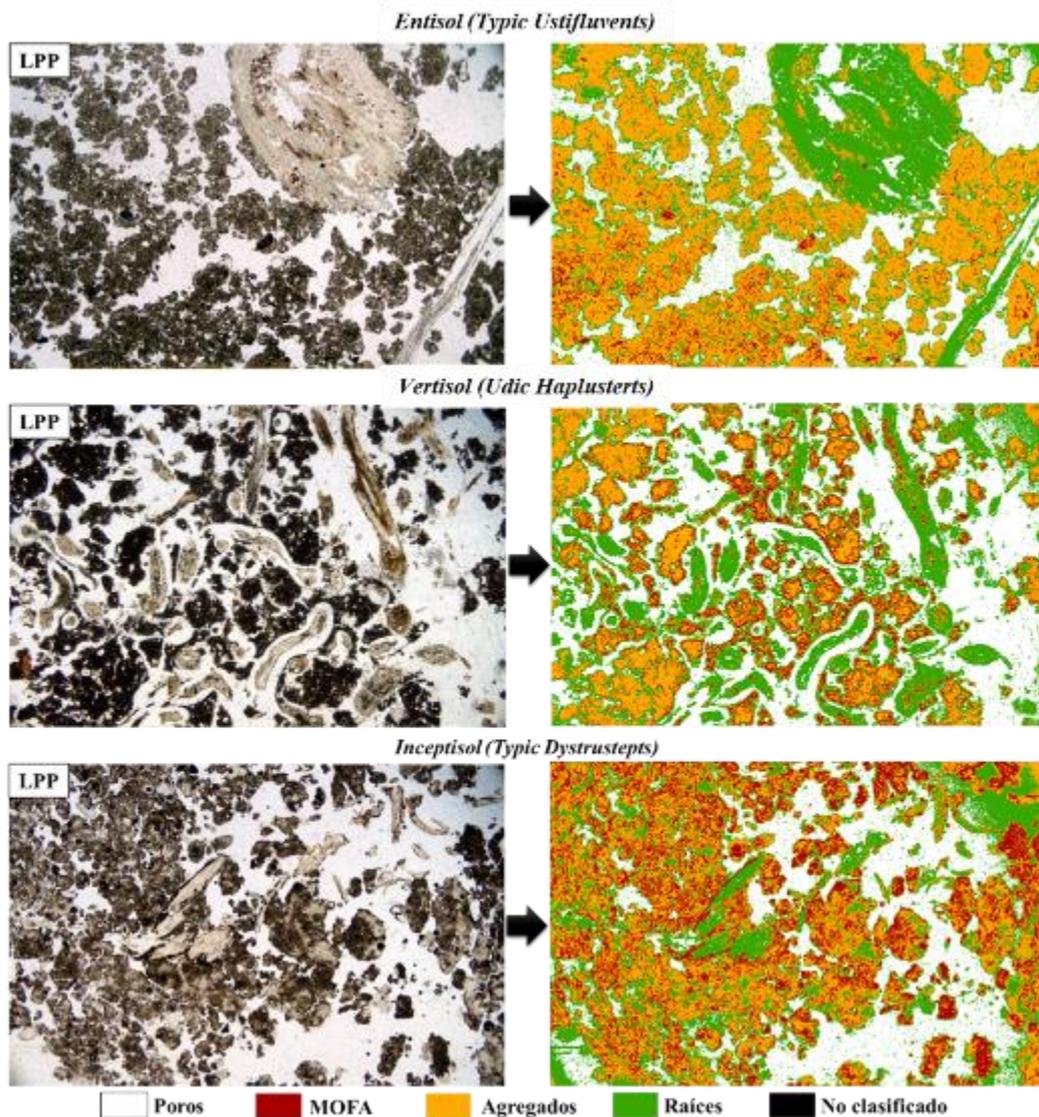


Figura 1. Mapas temáticos de los componentes del suelo derivados de las clasificaciones supervisadas realizadas a imágenes capturadas en LPP. Longitud del marco 11.6 mm.

Este tipo de problemas han sido reportados por Aydemir *et al.* (2004), los cuales proponen el aumento en el número de sitios de entrenamiento (>100) para mejorar la precisión de las clasificaciones; sin embargo, en las clasificaciones practicadas en Entisol y Vertisol la P.G. y el índice de Kappa evaluados pueden ser considerados suficientes y representativos al momento de cuantificar las raíces. Por su parte, Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018) proponen el uso de diferentes fuentes de iluminación y su combinación a través de procedimientos aritméticos conocidos como álgebra de mapas para aumentar el contraste entre componentes y obtener dominios espectrales únicos y característicos de cada objeto.

Combinación de imágenes con álgebra de mapas

La precisión de las clasificaciones usando álgebra de mapas para maximizar el contraste entre los componentes del suelo con diferentes propiedades ópticas, resultó en índices de concordancia casi perfectos para el Entisol y Vertisol (0.85 y 0.80 respectivamente); mientras que sólo fue aceptable en el Inceptisol (0.65). Con respecto de la P.G. los valores obtenidos son ligeramente más bajos (diferencias < 3%) que los calculados en una sola fuente de iluminación (LPP) para todos los casos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cálculo de las matrices de confusión derivadas de las clasificaciones supervisadas utilizando imágenes provenientes de la combinación (álgebra de mapas) de tres tipos de iluminación (LPP, LPX y LPXλ) en las diferentes unidades de suelo.

Usuario	Clasificación software						P.U. (%)	P.S. (%)	P.G. (%)	K	Dominios espectrales			C.T. %
	MOFA	Agregados	Raíces	Poros	Minerales	Total					R	G	B	
<i>1. Entisol (Typic Ustifluvents)</i>														
MOFA	1120	15	0	0	0	1135	99	98			0-42	0	0-27	3
Agregados	22	15017	2775	4	0	17818	84	93			73- 150	94- 150	47- 109	39
Raíces	0	1057	35981	2977	3	40018	90	82	91	0.85**	113- 255	68- 255	92- 230	29
Poros	0	3	3048	66233	0	69284	96	96			156- 174	116- 141	169- 96	28
Minerales	0	0	1882	0	1392	3274	43	99			255	255	255	1
Total	1142	16092	43686	69214	1395	131529								
P.P. (%)	98	93	82	96	100									
<i>2. Vertisol (Udic Haplausterts)</i>														
MOFA	508	296	2	0	0	806	63	89			43-64	43-60	43-56	33
Agregados	65	948	2317	1	0	3331	28	75			34-76	34-70	39-70	24
Raíces	0	12	35242	11276	907	47437	74	88	93	0.80**	97- 206	92- 238	62- 203	27
Poros	0	0	1487	241485	376	243348	99	94			181- 206	169- 186	180- 203	13
Minerales	0	0	1562	4330	16285	22177	73	93			255	255	255	3
Total	573	1256	40610	257092	17568	317099								
P.P. (%)	89	75	88	94	93									
<i>3. Inceptisol (Typic Dystrustepts)</i>														
MOFA	263	161	0	0	0	424	62	99			oct-22	20-36	31-46	5
Agregados	2	12012	4341	210	0	16565	73	95			62-98	63- 118	51- 104	47
Raíces	0	407	17991	15113	169	33680	53	59	87	0.65*	159- 245	11- 253	71- 244	16
Poros	0	109	6381	153741	1	160232	96	91			168- 188	148- 180	164- 198	31
Minerales	0	0	1888	60	2420	4368	55	93			255	255	255	1
Total	265	12689	30601	169124	2590	215269								
P.P. (%)	99	95	59	91	93									

MOFA, Materia orgánica fina amorfa; P.U. precisión del usuario (micromorfólogo); P.G. Precisión global; K, índice de Kappa-Cohen; C.I., Cuantificación total; P.S. Precisión del software.

** , Concordancia casi perfecta en índice de Kappa-Cohen; * , concordancia considerable de índice de Kappa-Cohen. Criterio según Richards (2013).

La finalidad de la combinación de los diferentes tipos de iluminación con álgebra de mapas fue maximizar el contraste y reducir la opacidad de los componentes del suelo; aunque sólo en

el Entisol se obtuvieron dichas mejoras en la P.U. de las FOI (MOFA, raíces y poros) con respecto al uso de la LPP. Contrariamente, en los tres suelos se cuantificaron reducciones considerables en la P.U. de los agregados (14, 70 y 22% en Entisol, Vertisol e Inceptisol respectivamente) con respecto a la LPP a causa del escaso contraste con las raíces (Figura 2). Tal efecto puede ser atribuido a que las operaciones aritméticas probadas en las imágenes no son capaces de generar diferencias entre las raíces y los agregados. Además, las raíces tuvieron traslapes con los minerales del suelo y no se pusieron a diferenciar diferentes grados de descomposición ya que, la máxima birrefringencia fue registrada en estos dos componentes ocasionando traslapes de 50, 10 y 40% en Entisoles, Vertisols e Inceptisoles. Estos datos son contrarios a los reportados por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018) quienes lograron mejorar la precisión del usuario y global con el uso de esta técnica; sin embargo, el suelo ensayado se componía completamente de materiales orgánicos con escasa presencia de minerales. Posibles soluciones a este problema pueden ser el uso de tinciones específicas a tipos específicos de luz, tal es el caso de las bacterias en luz UV marcadas por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016) y así evitar el traslape con los minerales utilizando algoritmos que evalúen la estructura basados en la morfología los minerales (Obara, 2007) o bien la aplicación algoritmos que mejoren los patrones de reconocimiento entre los bordes de minerales y componentes del suelo (Młynarczyk *et al.*, 2013).

Otra alternativa es el análisis separado de cada tipo de iluminación para su posterior análisis mediante procedimientos geománticos, lo que facilitaría el procesamiento de las imágenes al poder identificar las raíces y extraer los polígonos correspondientes a cada tipo de luz para finalmente poder realizar operaciones en las que se demuestren los diferentes tipos de descomposición (Torres-Guerrero *et al.*, 2016).

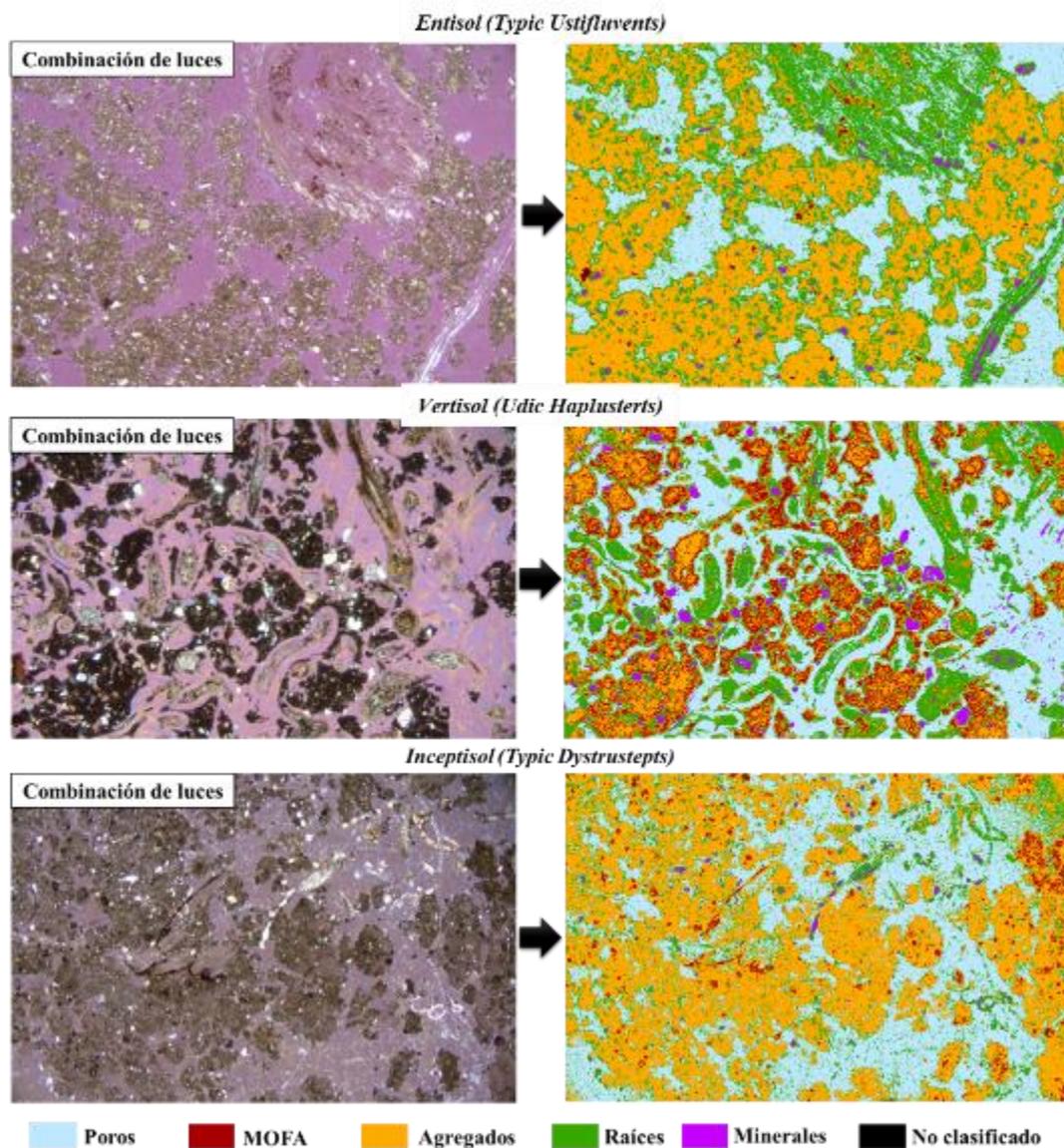


Figura 2. Mapas temáticos de los componentes del suelo utilizando tres tipos de iluminación (LPP, LPX y LPX λ) y combinándolos con álgebra de mapas para obtener la máxima birrefringencia y mínimo grado de opacidad (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2017). Longitud del marco 11.6 mm.

Transformación de componentes principales

El resultado de la TCP evidenció en los tres suelos que el primer componente representa >70% de la información de las nueve bandas examinadas (tres bandas por cada foto) y junto al segundo componente las imágenes pueden ser explicadas más allá de 90% sólo con estas dos capas (Cuadro 3). Se ha demostrado anteriormente que este tipo de transformaciones permite la reducción considerable del volumen de información (Terribile y Fitzpatrick, 1995; Ng, 2017). La TCP es útil para la compresión de la información en la menor cantidad de bandas posibles sin pérdida de información con reducciones de hasta 50% en el tamaño de archivo haciendo más fácil su procesamiento digital (Vallathan y Jayanthi, 2015). Dicha transformación obtiene

los valores lineales (en escala de grises) de cada banda y los agrupa en los componentes para eliminar redundancia en los datos y ruido en las imágenes, por lo que también se puede utilizar para mejorar la calidad de las imágenes, por ejemplo, cuando son construidos mosaicos de imágenes secuenciales (Richards, 2013; Li, 2016) y aminorar considerablemente el tiempo de análisis de múltiples bandas.

Cuadro 3. Resultados del Análisis de Componentes Principales realizados a las tres imágenes con distintos tipos de iluminación en cada unidad de suelo.

Componente	Eigenvalor	Porcentaje eigenvalor (%)	Porcentaje acumulado (%)
<i>Entisol (Typyc Ustifluvents)</i>			
1	14128.7389	78.08	78.08
2	3364.41429	18.59	96.67
3	601.94312	3.33	100
<i>Vertisol (Udic Haplausterts)</i>			
1	19319.0412	71.09	71.09
2	6900.69115	25.39	96.49
3	953.91087	3.51	100
<i>Inceptisol (Typic Dystrustepts)</i>			
1	15661.3517	70.33	70.33
2	5161.99745	23.18	93.51
3	1445.09753	6.49	100

La precisión de las clasificaciones hecha al primer componente principal arrojó índices de Kappa con concordancia casi perfecta para el Entisol y aceptables para el Vertisol e Inceptisol. La P.G. en general fue >80% en todos los casos indicando que este tipo de transformación y su posterior clasificación resultan ser una alternativa para el análisis de los componentes del suelo. Además, el segundo componente sirvió para extraer los datos de mayor birrefringencia (Figura 3) y al ser extraídos de los polígonos principales de las raíces permitieron su cuantificación en dos estados de descomposición (bajo y moderado).

La P.U. alcanzó los valores con mayor uniformidad para delimitar todos los componentes del suelo, el único porcentaje bajo registrado fue en el Vertisol (33%), todos los demás casos fueron >75% siendo este procedimiento en que asegura la mejor diferenciación en términos visuales para el usuario. Esta precisión puede aumentarse al incluir un mayor número de campos de entrenamiento para realizar la clasificación; no obstante, existen estudios que demuestran una correlación lineal entre el número de campos de entrenamiento y la precisión de las clasificaciones al utilizar la regla de decisión fuzzy en lugar de la del paralelepípedo (Ma *et al.*, 2017). Con la aplicación de esta regla los objetos con gran homogeneidad en sus dominios espectrales pueden ser separados con mayor facilidad (Ma *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016).

Cuadro 4. Matrices de confusión de las clasificaciones realizadas al primer componente principal después de practicar la TCP.

Clasificación del usuario	Clasificación software					P.U. (%)	P.S. (%)	P.G. (%)	Índice Kappa	Dominio espectral		
	MOFA	Agregados	Raíces	Poros	Total					R	G	B
<i>1. Entisol (Typic Ustifluvents)</i>												
MOFA	275	102	0	0	377	98	89			0.04	0.04	0.04
Agregados	33	7195	1039	0	8267	87	98			0.276	0.276	0.276
Raíces	0	64	55690	9557	65311	73	93	95	0.9**	0.628	0.628	0.628
Poros	0	0	2915	219031	221946	85	96			0.836	0.836	0.836
Total	308	7361	59644	228588	295901							
P.P. (%)												
<i>2. Vertisol (Udic Haplausterts)</i>												
MOFA	404	15451	0	0	15855	86	75			0.152	0.152	0.152
Agregados	120	6750	447	0	7317	87	33			0.149	0.149	0.149
Raíces	0	508	65218	14541	80267	3	85	82	0.75*	0.542	0.542	0.542
Poros	0	0	12258	110128	122386	88	88			0.742	0.742	0.742
Total	524	22709	77923	124669	225825							
P.P. (%)												
<i>3. Inceptisol (Typic Dystrustepts)</i>												
MOFA	1885	2354	0	0	4239	97	93			0.09	0.09	0.09
Agregados	43	39381	2555	1	41980	56	76			0.361	0.361	0.361
Raíces	0	6615	28958	19944	55517	44	80	90	0.75*	0.646	0.646	0.646
Poros	0	0	6178	251305	257483	91	98			0.802	0.802	0.802
Total	1928	48350	37691	271250	359219							
P.P. (%)												

MOFA, Materia orgánica fina amorfa; P.U. precisión del usuario (micromorfológico); P.G. Precisión global; P.S. Precisión software.

**, Concordancia casi perfecta en índice de Kappa; *, concordancia considerable de índice de Kappa. Criterio según Richards (2013).

En términos generales, los tres métodos realizados en esta investigación muestran altos índices de correspondencia entre la clasificación del usuario (micromorfológico) y la del software (análisis de imagen), pero cuando se emplea la TCP la precisión del usuario aumenta para casi todos los componentes del suelo y las raíces pueden ser separadas en distintos grados de descomposición. Además, al emplear esta técnica de reducción de información es posible realizar su clasificación en mosaicos de alta resolución (> 4 GB) como los propuestos por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016; 2018) y Sauzet *et al.* (2017) sin que su procesamiento se vea afectado por la capacidad de procesamiento de los ordenadores de uso común.

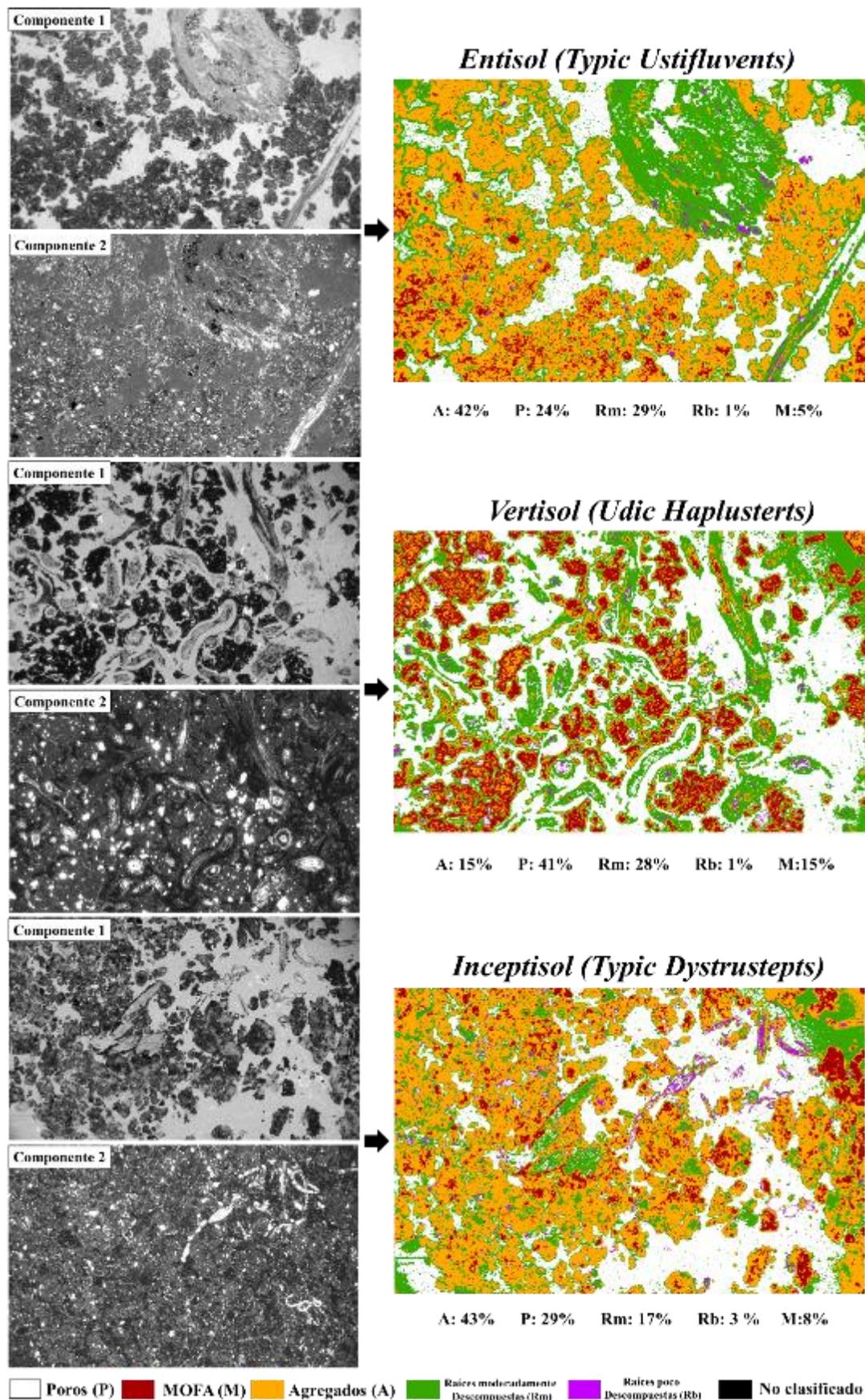


Figura 3. Primer y segundo componentes principales de la TCP (izquierda) realizada a las imágenes con tres tipos de iluminación (LPP, LPX y LPXλ 45°) y mapas temáticos de las raíces en diferentes estados de descomposición. Longitud del marco 11.6 mm.

CONCLUSIONES

La clasificación supervisada usando un sólo tipo de iluminación permitió identificar y cuantificar las raíces con precisión mayor a 90%; aunque en este procedimiento no se pueden establecer categorías de grados de descomposición.

Cuando se emplea el álgebra de mapas, la clasificación reduce el valor de la precisión global, de usuario (micromorfólogo) y los valores del índice de Kappa, por lo que es recomendable implementar clasificaciones a las imágenes por separado para posteriormente delimitar las raíces y generar categorías de descomposición.

La transformación de componentes principales permitió disminuir los volúmenes de información analizada optimizando el tiempo y procesamiento de las imágenes. Además, es capaz de producir delimitaciones y cuantificaciones con alto grado de concordancia entre el productor y el usuario sin emplear un alto número de campos de entrenamiento.

Es necesario un análisis específico para cada componente del suelo que asegure clasificaciones con alta precisión, por lo que hasta el momento no existe un proceso único capaz de cuantificar y delimitar todos los componentes de una sección delgada.

LITERATURA CITADA

- Adderley, W.P., Simpson, I.A. & Davidson, D.A. 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*, 108: 181–195.
- Bishop, Y.M.M., Feinberg, S.E. & Holland, P.W. 1975. *Discrete Multivariate Analysis—Theory and Practice*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T. & Babel, U. 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. *Waine Research Publications*, 605 Wolverhampton, UK
- De León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M.C.A. & Castillo-Juárez, H. 2007. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil. *Geoderma*, **142**, 308–317.
- Duda, R.O., Hart P.E., and R.G. Stork. 2001. *Pattern Classification*, 2nd ed., John Wiley & Sons, N.Y.
- Environmental Systems Research Institute 2015. *ArcGis 10.3 Computer Software*. Environmental Systems Research Institute Inc, Redlands, CA.
- Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., Vargas, T.G., Bontemps, L.C., Martínez, J.D., Méndez, E.S. & Solorio-Ortíz, C.A. 2016. Micromapping of microbial hotspots and bio films from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, 279: 11–21.
- Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V. Gonzalez-Vargas, T., Solorio-Ortíz, C.A., Suástegui Méndez, E.S, Cajuste Bontemps, L., Rodríguez Mendoza, M.N. 2017. Thematic micro-maps of soil components using high-resolution mosaics from whole soil thin sections and image analysis. *European Journal of Soil Science*. *In press*.
- Hexagon Geospatial 2014. *Hexagon Geospatial ERDAS IMAGINE 2014*. Hexagon Geospatial, Norcross, GA.
- Lee, J. B., Woodyatt, A. S. and Berman, M. 1990. Enhancement of high spectral resolution remote- sensing data by a noise-adjusted principal components transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 28(3): 295–304.
- Li, M., Ma, L., Blaschke, T., Cheng, L., Tiede, D., 2016. A systematic comparison of different object-based classification techniques using high spatial resolution imagery in agricultural environments. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 49, 87–98.
- Li, H., "Accurate and efficient classification based on common principal components analysis for multivariate time series," *Neurocomputing*, vol. 171, pp. 744-753, 2016.

- Ma, L., Cheng, L., Li, M., Liu, Y., Ma, X., 2015. Training set size, scale, and features in Geographic Object-Based Image Analysis of very high resolution unmanned aerial vehicle imagery. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 102, 14–27.
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P., Liu, Y., 2017. A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 130: 277-293.
- Maćkiewicz, M., Ratajczak, W. 1993. Principal components analysis (PCA). *In Computers & Geosciences.* 19(3): 303-342.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S. & Shatar, T.M. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97, 293–327.
- Murphy, C.P. 1986. Thin Section Preparation of Soils and Sediments. *AB Academic.* Berkhamsted, UK, 149 pp.
- Ng, S.C. 2017. Principal component analysis to reduce dimension on digital image. *Procedia Computer Science.* 111: 113-119.
- Noordwijk, M.G., H. Brouwer, F.W. Koning, W. Meijboom and W.Grzebisz. 1994. Production and decay of structural root material of winter wheat and sugar beet in conventional and integrated cropping systems. *Agricultural Ecosystems & Environment*, **51**, 99-113.
- Obara, B. 2007. Identification of transcrystalline microcracks observed in microscope images of a dolomite structure using image analysis methods based on linear structuring element processing. *Computers & Geosciences.* 33(2): 151-158.
- Poch, R.M. 2015. Micromorfometría. In: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementaria s (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 309-320. *Fondo Editorial Pascual Bravo*, Colombia.
- Richards, J.A. 2013. Remote Sensing and Image Analysis. Fifth edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York Dordrecht London.
- Russ, J.C. 2011. The image Processing Handbook. Sixth edition. *CRC Press Taylor & Francis group.* Boca Ranton, Florida, USA.
- Sauzet, O., Cammas, C., Marc, J., Bajard, M. & Montagne, D. 2017. Geoderma Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections. *Geoderma*, **292**, 135–148.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A. 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat. Methods* 9:676–682. <http://dx.doi.org/10.1038/nmeth.2019>.
- Silver, W.L., Miya, R.K., 2001. Global patterns in root decomposition : comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia.* 129: 407–419.
- Stoops, G. 2015. Composición de la masa basal y de los edaforrasgos. In: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias (eds J.C. Loaiza, G. Stoops, R.M. Poch, & M. Casamitjana), pp. 309-320. *Fondo Editorial Pascual Bravo*, Colombia.
- Swain, P.H. and Davis, S.M. 1978. Remote Sensing: the Quantitative Approach, McGraw-Hill, NY.
- Terribile, F. & FitzPatrick, E.A. 1992. The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections. *Geoderma*, **55**, 159–174.
- Terribile, F. & Fitzpatrick, E.A. 1995. The application of some image- analysis techniques to recognition of soil micromorphological features. *European Journal of Soil Science*, **46**, 29-45.
- Torres-Guerrero, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ortiz-Solorio, C.A., Herrera, J.M., Gutiérrez-Castorena, E.V., Etchevers B., J.D. 2016. Effect of root decomposition on the soil structure using micromapping. 15th International Conference on Soil Micromorphology. Mexico City.
- Vallathan, G. and Jayanthi, K. 2015. Lossless compression based on hierarchical extrapolation for biomedical imaging applications. *International Conference on Microwave, Optical and Communication Engineering (ICMOCE)*, Bhubaneswar, 2015, pp. 146-149.
- Zaiets, O. & Poch, R.M., 2016. Micromorphology of organic matter and humus in Mediterranean mountain soils. *Geoderma*, **272**, 83–92.
- Zhang, D.Q., Hui, D.F., Luo, Y.Q. & Zhou, G.Y. 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology.* 1: 85–93.

CONCLUSIONES GENERALES

El estudio multi-escala permitió relacionar los procesos de descomposición y producción de raíces en suelos agrícolas con la formación y mantenimiento de la estructura del suelo a diferentes niveles de organización.

Con los resultados de la escala megascópica (conocimiento local de suelos) fue posible generalizar y regionalizar la distribución de las raíces y el efecto que ejerce el manejo agronómico sobre la descomposición. Estos fenómenos se encuentran limitados a las parcelas con altos contenidos de humedad y rotación de cultivos.

La escala macroscópica obtenida mediante los núcleos de crecimiento interno y el análisis de suelo corroboró la información proporcionada por los productores locales acerca del proceso de descomposición. Los suelos “más” fértiles son aquellos donde la descomposición se lleva de manera rápida y no existe la formación de grietas ni el desecamiento del suelo debido a sus condiciones físicas (baja densidad aparente y sin presencia de grietas) óptimas para el crecimiento de los cultivos

En la escala microscópica, en los mosaicos de las secciones delgadas, se encontró que la escasa presencia de raíces aumenta considerablemente las clases de agregados de tamaños grandes ($> 5000 \mu\text{m}$), mientras que, si aumenta el número de raíces presentes en el suelo la una mayor proporción de agregados de clases finas ($500\text{-}1000 \mu\text{m}$) y medias ($1000\text{-}5000 \mu\text{m}$). En este sentido es evidente que los procesos de agregación en los suelos arcillosos son cíclicos debido a las prácticas de labranza que rompen la estructura del suelo en cada ciclo agrícola. Además, con el análisis de los mosaicos de alta resolución se facilitó la delimitación y cuantificación de las raíces presentes y fue posible separarlas en diferentes grados de descomposición para relacionarlas con los componentes del suelo.

Por último, el uso de imágenes capturadas con diferentes tipos de iluminación mejora el contraste para la delimitación de los constituyentes del suelo; mientras que la transformación de componentes principales facilita su clasificación al eliminar cálculos redundantes, comprime las imágenes y permite desarrollar contrastes en falso color para mejorar las cuantificaciones de las raíces y su relación con otros componentes del suelo.