



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS FUNCIONES AMBIENTALES DE LOS SUELOS DEL ESTADO DE
MICHOACÁN, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR (A) EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
MARÍA ÁNGELES GALLEGOS TAVERA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. FRANCISCO BAUTISTA ZÚÑIGA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM.

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. FELIPE GARCÍA OLIVA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD

DR. ALBERTO PEREIRA CORONA
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

MORELIA, MICHOACÁN, ENERO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos académicos

- Al Posgrado en Geografía del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.
- Al proyecto PAPIIT-UNAM No. IN209218: “Generación de modelos de evaluación ambiental del perfil del suelo en zonas volcánicas y de karst”.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para estudios de Doctorado (No. 480715).
- Al Laboratorio de Suelos y Agua del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- A la empresa SKIU por la licencia de uso del software Soil & Environment.

A los miembros del comité tutor por su paciencia y valiosos comentarios que contribuyeron al desarrollo del proyecto de tesis:

- Dr. Francisco Bautista Zúñiga (CIGA, UNAM)
- Dr. Felipe F. García Oliva (IIES, UNAM).
- Dr. Alberto Pereira Corona (UQROO)

A los miembros del jurado de examen por sus valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar la presente tesis y por aceptar ser parte del comité de evaluación para la obtención de grado:

- Dr. Felipe García Oliva
- Dr. David Jesús Palma López
- Dra. Yameli Aguilar Duarte
- Dra. Patricia Fragoso Servón
- Dr. Héctor Estrada Medina

Agradecimientos personales

- Al Dr. Francisco Bautista por ser mi tutor y maestro en cada grado de estudio, por su apoyo y paciencia, por abrirme las puertas hacia el ámbito de la investigación.
- A mis padres, por ser mi guía y mi balanza, por su infinita paciencia y cariño, por acompañarme siempre y hacer de mí la persona que soy.
- A mi esposo, por su comprensión y apoyo, por sus palabras de aliento que me motivaron y me llevaron a la terminación de este trabajo de tesis.
- A mis hermanas y mis sobrinos por alegrar mi vida.

Índice

Resumen	VII
Introducción general	1
Introducción	2
Objetivo general	3
Objetivos particulares.....	4
Estructura de la tesis	4
Referencias	7
Capítulo I. Historia y nuevos horizontes de la cartografía de suelos	10
1.1 Introducción.....	11
1.2 Prehistoria: las primeras evidencias de conciencia espacial.....	12
1.3 Edad antigua: los primeros registros del desarrollo de la cartografía	13
1.4 Edad media: dos visiones de la cartografía	16
1.5 Edad moderna: los primeros mapas catastrales de tierras.....	17
1.6 Edad contemporánea: geografía y funciones de los suelos.....	18
1.7 Hibridación de los enfoques de la cartografía de suelos	24
1.8 Conclusiones del capítulo I	26
1.9 Referencias del capítulo I	27
Capítulo II. Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico.....	34
Capítulo III. Quantitative assessment of environmental soil functions in volcanic zones from Mexico using S&E software	54
Capítulo IV. Uso de la cartografía pedológica y digital para representar las funciones ambientales de los suelos de Michoacán.....	69
4.1 Introducción.....	70
4.2 Materiales y métodos.....	71
4.2.1 Área de estudio.....	71
4.2.2 Mapa geopedológico	72
4.2.3 Mapas de las funciones ambientales de los suelos.....	80
4.3 Resultados y discusión.....	82
4.3.1 Mapa geopedológico	82
4.3.2 Mapas de las funciones ambientales de los suelos.....	87

4.4 Conclusiones del capítulo IV.....	92
4.5 Referencias del capítulo IV	105
Discusión y conclusiones generales.....	109
Discusión general.....	110
Conclusiones generales	112
Referencias	112
Apéndice I.....	113

Lista de cuadros

Cuadro 1. Factores formadores de los suelos del estado de Michoacán	78
Cuadro 2. Descripción de los paisajes geomorfológicos por ambientes morfogenéticos del estado de Michoacán	84
Cuadro 3. Correspondencias entre propuestas de regionalización para el estado de Michoacán	86
Cuadro 4. Aportaciones metodológicas y cartográficas del proyecto de tesis.....	111

Lista de figuras

Figura 1. Metodología híbrida para la creación de los mapas de las funciones ambientales de los suelos de Michoacán	6
Figura 2. Análisis de los enfoques tradicional y digital del mapeo de suelos.....	26
Figura 3. Localización del área de estudio.....	72
Figura 4. Proceso de validación de la capa de geoformas.....	73
Figura 5. Proceso para la generación de la capa de paisajes geomorfológicos.....	75
Figura 6. Proceso para la generación de la capa de paisajes geopedológicos y el mapa de la distribución espacial de los suelos	75
Figura 7. Distribución de los perfiles de suelos en el área de estudio.....	76
Figura 8. Proceso para la generación del mapa de ambientes morfogenéticos	77
Figura 9. Proceso para la generación de los mapas de las funciones ambientales	81

Lista de mapas

Mapa 1. Distribución de los ambientes morfogenéticos y paisajes edafológicos del estado de Michoacán, México	94
Mapa 2. Evaluación de la función de hábitat humano del estado de Michoacán, México	95
Mapa 3. Evaluación de la naturalidad de los suelos del estado de Michoacán, México	96
Mapa 4. Evaluación de la función de archivo histórico del estado de Michoacán, México	97
Mapa 5. Evaluación de la descomposición de compuestos orgánicos del estado de Michoacán, México	98
Mapa 6. Evaluación de la calidad de agua de recarga al acuífero del estado de Michoacán, México	99
Mapa 7. Evaluación de la cantidad de agua de recarga al acuífero del estado de Michoacán, México.....	100
Mapa 8. Evaluación de la retención de metales pesados del estado de Michoacán, México.....	101
Mapa 9. Evaluación de la retención de nutrimentos del estado de Michoacán, México	102
Mapa 10. Evaluación de la calidad agrícola del estado de Michoacán, México	103
Mapa 11. Evaluación del contenido de carbono orgánico del estado de Michoacán, México	104

Resumen

Los suelos proporcionan una gran variedad de servicios ecosistémicos a través de las funciones que desempeñan (Adhikari y Hartemink, 2014). En este sentido, el recurso suelo es fuente de alimentos, fibra y agua dulce; contribuye a la seguridad energética y climática; mantiene la biodiversidad y brinda protección a los ecosistemas (McBratney et al., 2014). Dada su importancia, es necesario generar información edafológica con datos completos del perfil para realizar las evaluaciones de las funciones que los suelos pueden desempeñar.

La generación y análisis de la información edafológica ha dado un vuelco en tiempos recientes gracias al surgimiento de las nuevas tecnologías de la información y a los avances alcanzados en el área de la inteligencia artificial. Una de las ramas de la inteligencia artificial más utilizadas en las ciencias del suelo en los últimos años, especialmente en el mapeo digital de suelos, es el aprendizaje automático.

El objetivo general de esta tesis fue la generación de modelos espacialmente explícitos de las funciones ambientales de los suelos del estado de Michoacán, utilizando una metodología híbrida que integrara los mapeos tradicional y digital de suelos.

En este trabajo de tesis se propusieron dos métodos que utilizan el aprendizaje automático para la inferencia de propiedades de los suelos no medidas. El primer método utilizó aprendizaje no supervisado en imágenes de perfiles de suelos para la identificación de horizontes y la cuantificación del volumen de fragmentos de roca. El segundo método aplicó aprendizaje supervisado para la generación de funciones de pedotransferencia de la densidad aparente de los suelos.

Los métodos propuestos para la inferencia de las propiedades de los suelos permitieron completar la información sobre los suelos para realizar la evaluación de las funciones ambientales. La evaluación de las funciones ambientales se realizó mediante la calibración de los modelos de evaluación del software Soil & Environment, considerando las características particulares de los suelos de zonas volcánicas, propias del área de estudio.

Se integró la parte del mapeo digital de suelos a la metodología híbrida través de los modelos de estimación de las propiedades de los suelos y la parte tradicional mediante el

enfoque geopedológico. La metodología híbrida permitió la generación de los mapas de distribución espacial de los tipos y funciones ambientales de los suelos del área de estudio.

El mapa de la distribución espacial de los suelos del estado de Michoacán a escala 1:250,000 mostró que los grupos de suelos que ocupan la mayor parte del territorio son los Andosols (28.04%), Leptosols (21.52%), Vertisols (14.11%) y Luvisols (13.22%).

Además, se generaron diez mapas de las funciones ambientales de los suelos a escala 1:250,000. Las funciones ambientales con mejores aptitudes para Michoacán fueron la recarga de acuíferos, la retención de nutrimentos y descomposición de compuestos orgánicos

Los trabajos presentados en esta tesis son una muestra de la aplicación de la nueva ciencia del suelo, la del siglo XXI, en México. Las metodologías propuestas y los mapas desarrollados son el punto de partida hacia la generación de información edafológica que pueda ser interpretada y utilizada por diferentes tipos de usuarios, con la finalidad de lograr en el futuro una mejor toma de decisiones enfocada en el mantenimiento del buen estado de los suelos y de las funciones y servicios ecosistémicos que nos brindan.



Introducción general



Introducción

Anteriormente el valor de los suelos se determinaba con base en su capacidad para la producción de alimentos (Bouma, 2009; CCE, 2006; Blum, 1993). En tiempos recientes, se basa en las diversas funciones que desempeña (ambientales, económicas, sociales y culturales). Esta noción ha permitido comprender como mantener el buen estado de los suelos se traduce en una buena calidad de vida para los seres humanos (McBratney et al., 2014).

Mantener el buen estado de los suelos requiere de información edafológica de alta calidad, rápida generación, fácil manejo y analizada espacialmente. El análisis espacial de los suelos puede realizarse utilizando el mapeo tradicional o el más reciente mapeo digital de suelos.

El mapeo tradicional de suelos implica una comprensión conceptual de los procesos y factores de formación del suelo para la generación de un modelo mental de la relación suelo-paisaje que permite determinar la distribución espacial de los suelos utilizando las características descriptivas y diagnosticas de los perfiles de suelo para su clasificación (FAO, 2012).

Uno de los enfoques del mapeo tradicional de suelos que ha sido utilizado ampliamente es el geopedológico (Bautista et al., 2015; Palma-López et al., 2017). Este incluye nociones de geomorfología, geología y geografía para el análisis de los patrones de distribución de los suelos (Zinck, 2016). Sin embargo, se encuentra más allá del enfoque tradicional fisiográfico donde lo relevante es el relieve, o el clima o la roca según cada autor, y donde se carece de una estructura jerárquica en cada taxón de acuerdo con una escala (Zinck, 2012).

Por otro lado, el mapeo digital de suelos permite la inferencia de las variaciones espaciales y temporales de los tipos y propiedades del suelo a partir de modelos numéricos generados con diferentes técnicas, tales como la minería de datos y geoestadística (McBratney et al., 2003). Este nuevo tipo de cartografía no es un sustituto del mapeo tradicional del suelo, sino más bien una forma de modernizarlo y desarrollarlo con métodos cuantitativos.

En nuestro país se han producido tanto mapas de suelos tradicionales que muestran la clasificación taxonómica de suelos, niveles de degradación o tipos de uso de suelo (INEGI, 2017; CONABIO, 2012), así como escasos estudios que utilizan el mapeo digital de suelos a nivel estatal (Fragoso et al., 2017).

Para el estado de Michoacán existen mapas tradicionales de los grupos de suelos (Bedolla-Ochoa et al., 2019); capas de datos de perfiles de suelos (INEGI, 2004; INEGI, 2013), y de tipos de uso del suelo y cubierta vegetal (INEGI, 2016); y pocos estudios dónde se evalúan las funciones de los suelos (Bedolla et al., 2018; Gallegos et al., 2019).

Por otro lado, los mapas de suelos de Michoacán que existen actualmente no toman en cuenta un enfoque geopedológico, son mapas taxonómicos y geológicos que tienen un sesgo al no considerar al relieve como principal factor formador del suelo, el cual es básico en zonas montañosas geológicamente recientes, como las del estado.

Además, debido a que los mapas de suelos muestran únicamente grupos de suelos o propiedades aisladas su uso se dirige hacia personas con conocimiento experto, por lo que es necesario dar una interpretación a la información para que pueda ser utilizada por diferentes niveles de usuarios, lo cual puede lograrse a través de la evaluación de las funciones ambientales de los suelos (Gallegos-Tavera et al., 2014; Bautista et al., 2016).

En este sentido, en el proyecto de tesis se buscó la generación de información edafológica del estado de Michoacán a) actualizada; b) que pudiera ser interpretada por diferentes usuarios potenciales del suelo; y c) basada en los factores formadores del suelo dominantes del área de estudio. Esto a través de una metodología híbrida que integró las ventajas del mapeo digital de suelos y de la geopedología, para lo cual se propusieron los siguientes objetivos:

Objetivo general

Generación de modelos espacialmente explícitos de las funciones ambientales de los suelos del estado de Michoacán utilizando una metodología híbrida.

Objetivos particulares

- Generar modelos matemáticos para la estimación de propiedades de los suelos de difícil medición que son necesarias para realizar la evaluación de las funciones ambientales de los suelos.
- Desarrollar modelos de evaluación de las funciones ambientales de los suelos que se adapten a las características particulares de los suelos de zonas volcánicas.
- Proponer una metodología híbrida para la elaboración de los mapas de las funciones ambientales de los suelos que integre el enfoque geopedológico y las técnicas del mapeo digital de suelos.

La parte digital de la metodología híbrida está dada por la creación de modelos matemáticos para la estimación de propiedades de los suelos utilizando técnicas de aprendizaje automático (primer objetivo particular); y por la actualización de los algoritmos de evaluación de las funciones ambientales de los suelos del estado (segundo objetivo particular). El enfoque geopedológico se abordó en la generación de los mapas de paisajes geopedológicos y de ambientes morfogenéticos (tercer objetivo particular). La integración de ambos se logró en los mapas de las funciones ambientales de los suelos (segundo y tercer objetivo particular) (Figura 1).

Estructura de la tesis

Se presenta en el Capítulo I una revisión de la historia de la cartografía de suelos. En los Capítulos II, III y IV se abordan los objetivos particulares de esta tesis. El documento cierra con una discusión, conclusiones generales y un apéndice que aborda un estudio de caso.

Capítulo I

El capítulo I de esta tesis tuvo como objetivo describir la evolución de la cartografía hasta llegar al desarrollo de la cartografía de suelos para integrar en una sola historia el desarrollo de los enfoques tradicional y digital del mapeo de suelos, ofreciendo un punto de vista que vislumbra su futuro en la hibridación de ambos enfoques.

Capítulo II

Para evaluar las funciones ambientales de los suelos es necesario tener bases de datos de propiedades de los suelos completas, es decir, que cuenten con datos de densidad aparente y volumen de fragmentos de roca. Por lo tanto, en el segundo capítulo de esta tesis se buscó la mejora de las bases de datos de perfiles de suelos disponibles para Michoacán, mediante la generación de modelos para la estimación de las propiedades faltantes. En este capítulo de tesis se presenta un artículo publicado en la revista *Geoderma Regional* que describe el desarrollo y prueba de un método de procesamiento de imágenes de perfiles de suelos para la delineación de horizontes y la determinación del volumen de fragmentos de roca (Gallegos et al., 2021).

Capítulo III

Los modelos de evaluación de las funciones ambientales de los suelos que existen actualmente no fueron diseñados para ser utilizados en suelos de zonas volcánicas, como las del estado de Michoacán. Por lo tanto, en el tercer capítulo de esta tesis se presenta un artículo publicado en la revista *Sustainability*, en el que se proponen calibraciones de los modelos de evaluación del software *Soil & Environment* considerando las características particulares de los suelos de zonas volcánicas (Gallegos et al., 2019).

Por otro lado, existen funciones de los suelos poco reconocidas, de las cuales es necesario generar modelos para su evaluación. En el apéndice I se presenta un manuscrito sobre la aptitud de los suelos para el establecimiento de cementerios, el cual se deriva de un estudio de caso, y que desafortunadamente cobra importancia en el contexto actual de la pandemia por COVID-19.

Capítulo IV

En el capítulo IV de esta tesis se describe como se realizó la integración de los enfoques tradicional y digital de la cartografía de suelos para la generación de los mapas de la distribución y evaluación de las funciones ambientales de los suelos del estado de Michoacán. En este capítulo se introduce el enfoque geopedológico y se retoman y amplían los resultados de los objetivos anteriores.

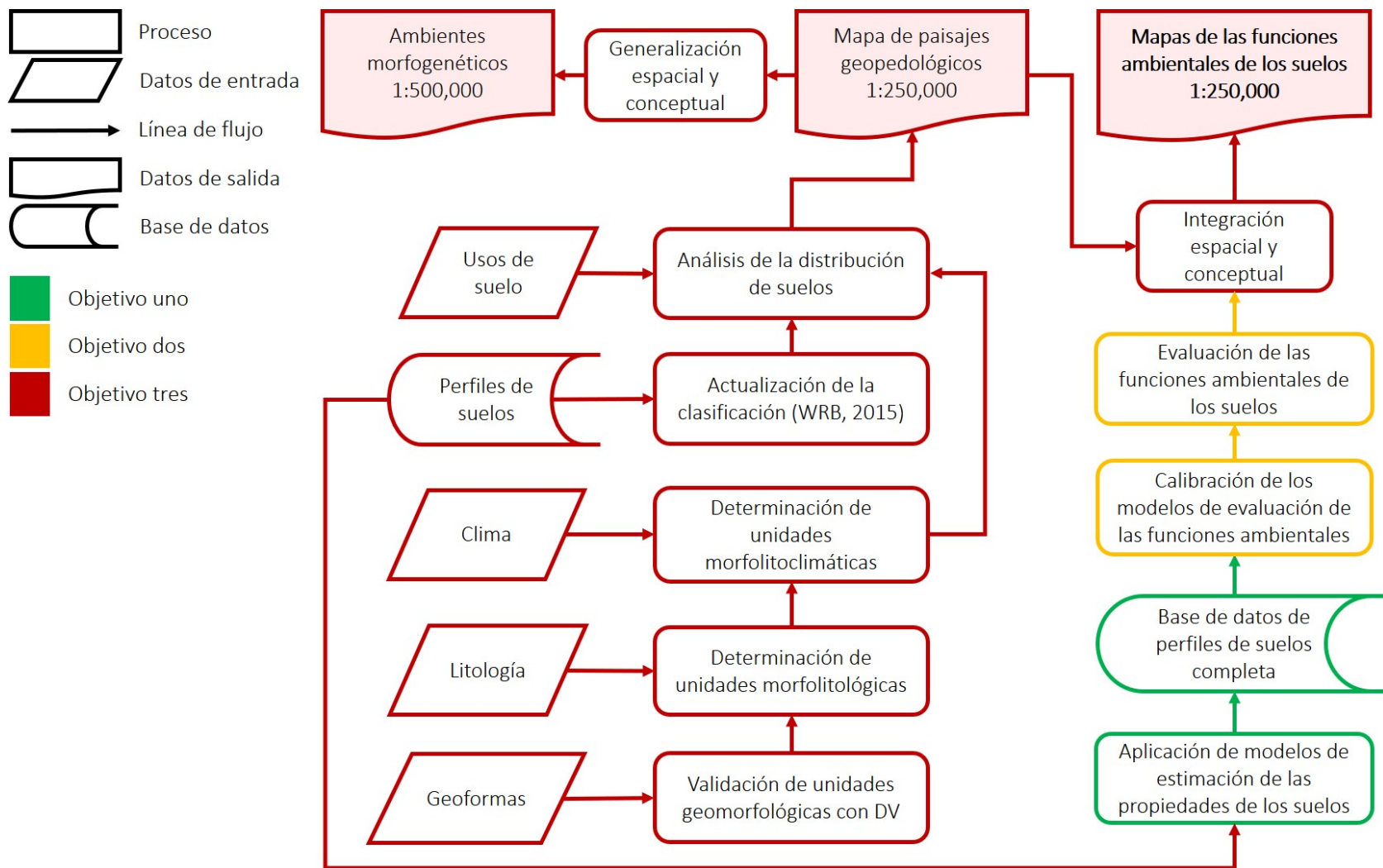


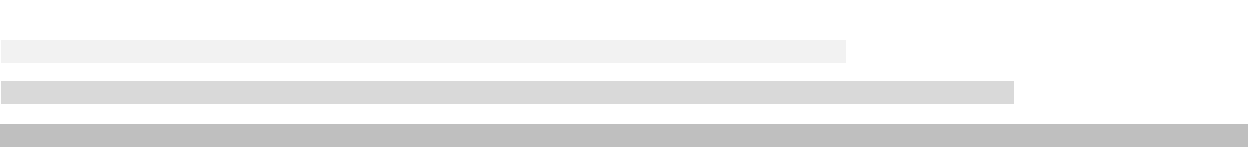
Figura 1. Metodología híbrida para la creación de los mapas de las funciones ambientales de los suelos de Michoacán

Referencias

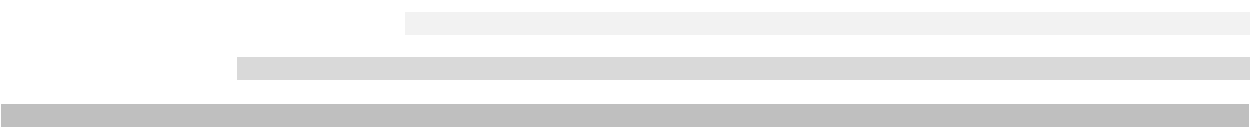
- Bautista, F., Cram, S., Sommer, I. 2011. Suelos. En: Bautista, F. (Ed.). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. pp. 227-258. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., Aguilar, Y. 2015. An update soil map of The Yucatán State, Mexico: Geomorphopedological approach and WRB. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(6), 303-279.
- Bautista, F.; Gallegos, A.; Pacheco, A. 2016. Analysis of the environmental functions of soil profile data (Soil & Environment), 2nd ed.; Skiu: Ciudad de México, México.
- Bedolla-Ochoa, C., F. Bautista, T. Ihl, I. Dubrovina. 2019. Diversidad de suelos y su distribución espacial. En: La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2, vol. I. México: CONABIO, pp. 51-59.
- Bedolla-Ochoa, C.; Bautista, F.; Gallegos, Á. 2018. Environmental functions of smallholder farmer land classes in the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve, México. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambient.*, 3, 265–274.
- Bocco, G., Mendoza, M. E., Velázquez Montes, A. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping. A tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39:211-219.
- Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2005. La biodiversidad en Michoacán, estudio de Estado (1ª ed.). México: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. Global soil partnership, technical report. State of the art report on global and regional soil information. Roma: Autor. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3161e.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. Guía para la descripción de suelos (4a Ed.). Roma: Autor.
- Fragoso, P., Pereira, A., Bautista, F., Zapata, G. 2017. Digital soil map of Quintana Roo, Mexico. *Journal of maps*, 13(2), 449-456. DOI: 10.1080/17445647.2017.1328317
- Gallegos, A., López-Carmona, D., Bautista, F., 2019. Quantitative Assessment of Environmental Soil Functions in Volcanic Zones from Mexico Using S&E Software. *Sustainability*, 11(17), 4552.

- Gallegos, A.; Bautista, F.; Dubrovina, I. 2016. Software to evaluate the environmental functions of soils. *Softw. Syst.*, 2, 195–200.
- Gallegos-Tavera, Á.; Bautista, F.; Álvarez, O. 2014. Software Assofu to assess environmental soil functions. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambient.*, 20, 237–249.
- Ihl, T. 2019. Localización geográfica y regionalización. En: *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2*, vol. I. México: CONABIO, pp. 21-29.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2001. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2004. Conjunto de datos vectorial edafológico. Serie I. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Conjunto de datos vectorial edafológico. Serie II. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación. Serie VI. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>
- IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources. 2015th ed.; World Soil Resources Reports No. 106; World Soil Resources: Rome, Italy.
- Lehmann, D.; David, S.; Stahr, K. 2008. TUSEC-Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils; Universität Hohenheim Bodenkundliche Hefte: Stuttgart, Germany. ISSN 0942-0754.
- McBratney, A., Mendonça-Santos, M., & Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3-52.
- McBratney, A.; Field, D.J.; Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213.
- Montiel-González, C., Gallegos, A., Ortega-Gómez, A., Bautista, F., Gopar-Merino, F., Velázquez, A. 2019. Análisis climático para la agricultura de temporal en Michoacán, México. *Ecosist. Recur. Agropec.* 6(17):307-316.
- Nelson, D., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, in: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Wisconsin, EUA, pp. 539–577.

- Palma-López, D. J., Jiménez Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista, F., Gavi Reyes, F., Palma-Cancino, D. Y. 2017. Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12), 29-35.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A. 2010. Propuesta para la delineación semiautomatizada de unidades del paisaje. México: SEMARNAT. 104 p.
- Rhoades, J., 1982. Cation exchange capacity, in: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph*. Wisconsin, EUA, pp. 178–190.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., 2012. *Field book for describing and sampling soils*, 3.0. Ed. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2015. *Cartografía Geológica de la República Mexicana*. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000>
- Siebe, C., Janh, R., Stahr, K., 2006. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, 4th
- Zinck, A. 2016. *The Geopedologic Approach*. In: Zinck J.A., Metternicht G., Bocco G., and Del Valle H.F. (Eds) *Geopedology*. Springer, Cham.



Capítulo I. Historia y nuevos horizontes de la
cartografía de suelos



1.1 Introducción

La cartografía de suelos ha evolucionado acorde con las herramientas, tecnológicas y metodológicas disponibles en cada etapa de la historia, por lo que los mapas de suelos son el producto tanto de un propósito, como de las tecnologías y métodos geográficos disponibles al momento de su elaboración (Thrower, 2007; Krasilnikov, 2011; Miller y Schaetzl, 2014; Miller y Schaetzl, 2016).

Se han utilizado diferentes enfoques para realizar la cartografía de suelos a través del tiempo, tales como el de capacidad de uso (USDA, 1961); agrícola (Minasny y McBratney, 2016), agrogeológico (Hartemink et al., 2013). Estos enfoques han sido considerados del tipo tradicional ya que emplean métodos cualitativos que parten del conocimiento experto del cartógrafo (FAO, 2012).

A principios del siglo XXI sucedió una confluencia de factores, entre los que se encuentran: a) un aumento en la demanda mundial de información espacial; b) la mejora de las herramientas para la gestión de datos espaciales; y c) el aumento de la capacidad informática para el procesamiento de información, que al converger dieron lugar a un nuevo enfoque cuantitativo de la cartografía de suelos: *el mapeo digital de suelos* (McBratney et al., 2003).

Este hecho incitó comparaciones entre los enfoques tradicional y digital. Por ejemplo, Brus y colaboradores (2012) encontraron diferencias en ambos enfoques en términos de eficiencia y densidades de costos para la actualización de mapas de clasificación y de propiedades de los suelos; y Roecker y colaboradores (2010) identificaron la necesidad de una mayor investigación al comparar de forma cualitativa grupos de suelos en mapas tradicionales y digitales.

En los últimos tiempos se han escrito revisiones sobre la cartografía de suelos con énfasis ya sea en los enfoques tradicionales (Hartemink et al., 2013; Brevik et al., 2016; Rodrigo-Comino et al., 2018) o en los digitales (Lagacherie, 2008; Grunwald, 2010; Minasny y McBratney, 2016) reseñando sus principales aportaciones científicas a través de la historia. Sin embargo, hasta ahora no se ha considerado una perspectiva integradora, en la

que se narre desde los primeros mapas del hombre hasta el desarrollo de los métodos digitales para la elaboración de mapas de suelos.

En este sentido, el objetivo de este capítulo fue describir la historia de la cartografía de suelos a manera de línea de tiempo para mostrar el surgimiento y desarrollo de los enfoques tradicional y digital del mapeo de suelos, ofreciendo un punto de vista que vislumbra su futuro en la hibridación de ambos enfoques.

1.2 Prehistoria: las primeras evidencias de conciencia espacial

Desde sus inicios, la humanidad ha podido comprender los componentes del ambiente y sus fenómenos geográficos mediante la creación y utilización de mapas, por lo que estos instrumentos son tan antiguos como la humanidad misma. Las primeras evidencias de conciencia espacial de los seres humanos quedaron preservadas en mapas prehistóricos grabados en piedra que usualmente mostraban características de paisajes locales y que posiblemente eran utilizados como planes de caza (Utrilla et al., 2009).

El mapa del arte prehistórico representaba tanto características del paisaje, como formas humanas y de animales. Es posible que el hombre prehistórico realizara representaciones cartográficas no solo en materiales relativamente indestructibles, como la piedra, sino también en instrumentos más efímeros, como la arena, el cuero, la corteza y el polvo de los pisos de las cuevas (Delano, 1987).

Las representaciones espaciales de los ambientes de la prehistoria parecen no poseer un énfasis particular en los suelos, más bien podrían interpretarse como una perspectiva de lo circundante. Las representaciones sobrevivientes constituyen una porción muy pequeña de los mapas que pudieron dibujarse en esa época, debido principalmente a la poca durabilidad de algunos materiales seleccionados, lo que deja cierta incertidumbre de si en algún momento los suelos pudieron ser la inspiración central de alguna pieza de arte rupestre del hombre antiguo.

1.3 Edad antigua: los primeros registros del desarrollo de la cartografía y del conocimiento de los suelos

Las condiciones iniciales para la preservación del conocimiento geográfico en materiales impresos fueron establecidas a finales del IV milenio a.C., tras la invención de la escritura cuneiforme en Mesopotamia. Los primeros mapas de Mesopotamia se realizaron en tablas de arcilla sobre el año 2300 a.C. El más reconocido es el *Mapa Mundial de Babilonia*, que fue dibujado hacia el año 600 a.C. y que consiste en un diagrama de la relación del mundo babilónico con las regiones ubicadas más allá del océano que lo rodeaba (Millard, 1987).

Si bien no existe registro de que en Mesopotamia se crearan mapas de suelos, sus conocimientos sobre canales de irrigación y patrones de cultivo en base a observaciones de fertilidad son evidencias del desarrollo temprano de una ciencia del suelo en esa época (Brevik, 2005; Brevik y Hartemink, 2010).

Otro lugar de producción temprana de mapas fue Egipto, sus primeros productos cartográficos se remontan al año 3100 a.C., y se tratan mayormente de imágenes con conceptos cosmológicos y míticos (Shore, 1987). El documento cartográfico más reconocido del Egipto antiguo es *el Papiro de Turín*, que data del año 1150 a.C. y que representa una zona minera (Harrell y Brown, 1992). Con respecto al conocimiento de los suelos, los egipcios desarrollaron su civilización alrededor del río Nilo desde el año 3300 a.C. hasta el 332 a.C., por lo que la base de su entendimiento del suelo se fundamentaba en el uso agrícola basado en el riego (Brevik, 2005; Brevik y Hartemink, 2010).

La antigua China tuvo también importantes aportaciones al conocimiento de los suelos, esta civilización desarrolló un sistema de clasificación de suelos que data de hace aproximadamente 4,000 años y que se basa en propiedades del suelo, tales como el color, la humedad, textura y vegetación (Brevik, 2005). Desde hace 2,000 años esta civilización ya interpretaba la fertilidad del suelo como una propiedad dinámica que podía cambiar en el tiempo. Su literatura agrícola surgió en el siglo XIV a. C., y su calendario agrícola se puede documentar en el siglo II a.C. Los primeros registros de conservación del suelo en China datan del 956 a.C. (Brevik y Hartemink, 2010).

Algunos mapas reconocidos de la antigua China son el *Mapa de Han*, fechado alrededor del año 168 a.C., que simboliza un logro en la representación precisa de terrenos, carreteras y asentamientos humanos (Hsu, 1978). Y los siete *Mapas de Qin*, dibujados alrededor del año 168 a.C. sobre pedazos de madera, representan montañas, arroyos, valles y lugares específicos con una orientación precisa (Hsu, 1993).

El conocimiento del suelo también se desarrolló en América durante la antigüedad. La agricultura existía en México ya en el siglo V a.C. e incluía prácticas de conservación del suelo mediante la construcción de terrazas y sistemas de riego a través del uso de islas artificiales hechas de barro lacustre, denominadas chinampas (Krasilnikov et al., 2013). En la cultura azteca, era común mostrar en un solo documento las relaciones de propiedad de la tierra y la productividad y propiedades del suelo. Los Aztecas y los Mayas desarrollaron los mejores sistemas documentados de clasificación de suelo y tierra que existen (Brevik, 2005).

La civilización antigua que tiene más registros de aportaciones al desarrollo de la cartografía en épocas tempranas es la griega, ya que fue en la Grecia antigua dónde la elaboración de mapas logró adquirir un carácter científico. Los principales hallazgos cartográficos de esta civilización se enfocaron en ubicar el mundo conocido por el hombre (la *ecúmene*) y fueron producidos desde el siglo VI a.C. hasta siglo II d.C., tiempo que puede ser dividido en cuatro periodos: 1) arcaico y clásico, 2) helenístico, 3) grecorromano, y 4) época de Ptolomeo (Dilke, 1987a; Harley et al., 1987a).

Los documentos cartográficos datados en el periodo arcaico y clásico (hasta el siglo IV a.C.) poseen mayormente una naturaleza teórica y especulativa debido a la escasez de estudios empíricos en la época. Los trabajos más sobresalientes de este periodo fueron escritos por Aristóteles del 384 al 322 a.C., y destacan por sus ideas sobre la racionalización de la forma esférica de la tierra y por su incitación para ampliar el conocimiento de la *ecúmene* (Harley et al., 1987a).

El periodo helenístico (siglos IV y III a.C.) se caracterizó por aportar conocimiento empírico al estudio cartográfico, de tal forma que una de las tendencias destacadas de la época fue la de expandir el estudio geográfico mediante la relación de teorías y modelos

matemáticos con hechos adquiridos en el curso de la expansión del mundo griego (Harley et al., 1987b). Entre las aportaciones más sobresalientes de este periodo están la elaboración de modelos tridimensionales del sistema celeste y los trabajos de Eratóstenes, entre los que se distinguen su medición de la circunferencia de la tierra y su mapamundi, que fue uno de los primeros mapas en los que se incluyeron paralelos y meridianos (Harley et al., 1987b).

El conocimiento cartográfico del periodo helenístico fue transmitido hacia el periodo grecorromano (del siglo II a.C. al II d.C.) a través de las relaciones maestro-alumno. Este periodo se caracteriza por la crítica hacia los intentos anteriores de mapeo, gracias a la cual se produjo una reformatión del conocimiento cartográfico mediante el uso de técnicas científicas, como la observación rigurosa y la deducción (Harley et al., 1987c). La culminación del pensamiento geográfico griego radica en las obras de Ptolomeo (siglo II d.C.). Entre sus legados más importantes se encuentra su obra *La Geografía* (Dilke et al., 1987a; Delgado y Caretta, 2008).

Los científicos griegos eran excelentes observadores de la naturaleza, por lo que desarrollaron también una clara comprensión de los suelos, reconociendo sus diferencias desde el milenio II a.C. (Brevik y Hartemink, 2010). También tuvieron éxito al elegir cultivos adecuados para los suelos de sus colonias, tenían literatura dedicada a las prácticas de manejo del suelo y escribieron sobre su capacidad para almacenar agua (Brevik, 2005). Sin embargo, a pesar de sus conocimientos avanzados, no generaron una ciencia formal para el estudio del suelo y tampoco lo relacionaron con la cartografía.

Los conocimientos cartográficos de la antigua civilización griega constituyeron la base de la elaboración de los mapas del imperio romano, los cuales se utilizaron con fines políticos y prácticos, tales como viajes, comercio, ingeniería, educación, propaganda y planeación urbana (Dilke, 1987b). La innovación de esta época está en la generación de modelos de uso de la tierra.

Entre los documentos cartográficos más importantes del imperio romano se encuentran el *Mapa Mundial de Agripa*, el cual se cree que es un modelo de mapas mundiales (Dilke, 1987b); y el *Corpus Agrimensorum*, que contiene los principales escritos

de topografía de la historia romana, desde la época de la república hasta el bajo imperio (Dilke, 1987c). El desarrollo del conocimiento de los suelos en Roma también fue influenciado por las nociones de la civilización griega, sin embargo, los romanos fueron un paso más allá de las ideas griegas sobre la fertilidad de los suelos.

El uso más común de los mapas en la civilización romana fue la centuriación, que consistía en la división topográfica, registro y asignación de tierras a los colonos romanos, proceso que era realizado por los agrimensores. La centuriación se destacaba por su precisión desde el punto de vista jurídico y administrativo y podría ser considerada una base para el desarrollo de la profesión del reconocimiento de suelos (Dilke, 1987c).

Al desarrollarse una forma más duradera para la preservación del conocimiento, las grandes civilizaciones antiguas pudieron transmitir a través de los años sus avances en el conocimiento de los suelos y la cartografía. En este punto de la historia aún no se vislumbra una integración tangible de ambos conocimientos, pero si los primeros intentos hacia su unión.

1.4 Edad media: dos visiones de la cartografía

La Edad Media tuvo un período de represión de la ciencia que incluyó un abandono de los conocimientos de los suelos heredados por las culturas griegas y romanas. Este deterioro se debió en gran parte al dominio de la religión en la vida occidental y a la ausencia de una progresiva comunidad científica. Sin embargo, el conocimiento del suelo si existió en este período y se difundió hacia otras partes del mundo donde la religión tenía menos influencia (Brevik y Hartemink, 2010).

Los mapas ideológicos del mundo de la edad media basados en la tradición clásica griega pero adaptados a propósitos de la iglesia cristiana eran llamados *mappaemundi*, estos tenían como objetivo instruir a los fieles sobre los eventos significativos de la historia cristiana (Woodward, 1987). El tipo de *mappaemundi* más utilizado fue el tripartito, también conocido como mapa T en O u *Orbis Terrarum*, el cual representaba una visión del mundo fundamentada en principios religiosos sobre la configuración de tierras, mares,

regiones y climas (Delgado y Caretta, 2008). Otros tipos de *mappaemundi* de la época fueron los zonales, cuadripartita y transicionales (Woodward, 1987).

Si bien los *mappaemundi* pertenecen a la vertiente ideológica de la cartografía del Medioevo, la tradición de las cartas de navegación, los portulanos, los mapas locales, regionales y los mapas celestes corresponden a la visión empírica de la época (Woodward, 1987). Los portulanos medievales son cartas que preservaron la experiencia de los marinos mediterráneos de su propio mar y del Océano Atlántico, por lo que son la declaración más clara del conocimiento geográfico y cartográfico del Mediterráneo (Campbell, 1987).

1.5 Edad moderna: los primeros mapas catastrales de tierras

El renacimiento se extendió aproximadamente entre el siglo XIV y el siglo XVII, esta época fue un período en el que la ciencia y el pensamiento científico comenzaron a crecer a pasos agigantados (Brevik, 2005; Hartemink y McBratney, 2008).

El Renacimiento cartográfico de los siglos XVI y XVII constituyó un progreso geográfico que significó una mejora en la medición de la ubicación de lugares y de características naturales en el mundo (Woodward, 2007). Sin embargo, los cambios cartográficos del Renacimiento coincidieron también con un período en el que en Europa los hombres luchaban para capturar el territorio de otros o para retener el suyo, por lo que los avances en topografía, proyecciones cartográficas, uso de escalas y métodos de producción se llevaron a cabo en un contexto de guerra (Hale, 2007).

Alrededor del mundo durante la edad moderna el suelo fue considerado un factor significativo en la economía, ya que su importancia residía en su valoración para fines impositivos, una tarea que incluía una evaluación detallada de sus capacidades para diferentes usos; ante la necesidad de realizar las evaluaciones y planificaciones del uso de los suelos, se generaron los mapas catastrales (Kain, 2007).

A mediados del siglo XVI, aumentó el uso de estos mapas como evidencias sobre disputas de propiedad y de derechos sobre las tierras, y desde entonces siguió siendo importante su uso durante todo el período moderno, tal es el caso de los códigos de Santa María Asunción y de Vergara, los cuales son manuscritos pictóricos creados hace

aproximadamente 500 años que presentan registros de tierras y de población (Williams et al., 2008). Estos códigos son considerados los mejores sistemas de clasificación de suelos de la cultura prehispánica (Krasilnikov et al., 2013).

En Reino Unido los levantamientos de tierras fueron muy utilizados después del inicio de la Reforma anglicana a mediados del siglo XVI; sin embargo, el mapeo de tierras se llevó al cabo hasta finales de este siglo. En el siglo XVII, los topógrafos ingleses tendían a enfatizar el registro preciso del uso de los suelos, sus recursos y los datos cuantitativos de su superficie (Woodward, 2007).

Los mapas de tierras a gran escala, que usualmente consistían en manuscritos, fueron conocidos en Reino Unido como *mapas de bienes*, en Francia como *planes de terriers*, *planes parcelarios* o *planes de nacimiento*, en Alemania como *Flurpläne*, y en las colonias de Europa como *terrenos* (Kain, 2007).

En este punto de la historia, la relación entre la cartografía y los suelos era estrecha, pero basada en la recolección geográfica de datos para el establecimiento de límites de propiedad, por lo que se resumía la información del suelo a partir de delineaciones de campo, en lugar de ser considerado como un cuerpo natural. Sin embargo, aunque en el siglo XVIII la ciencia del suelo no se había establecido formalmente, conceptos importantes sobre los suelos se refinaron en esta época a partir de diversos estudios. Las investigaciones se centraban ahora en los fenómenos que ocurrían en suelo, como el suministro de nutrientes vegetales y sus cambios a lo largo del tiempo (Brevik, 2005).

Los mapas de suelos a partir de este siglo tuvieron principalmente un enfoque agrícola, por lo que representaban áreas homogéneas de atributos característicos (Minasny y McBratney, 2016). Los mapas temáticos que vendrían posteriormente serían un ingrediente clave para mejorar estos mapas de suelos (Miller y Schaetzl, 2014).

1.6 Edad contemporánea: geografía y funciones de los suelos

A inicios del siglo XIX los geógrafos lograron interpretar la información espacial a través del entendimiento de reglas de comportamiento y ubicación de los objetos geográficos, lo que permitió que la demanda de documentos cartográficos dejara de

limitarse a mapas con información general y se diversificara a mapas con temas específicos (Krasilnikov, 2011).

Este suceso dio lugar a los primeros mapas temáticos elaborados por diferentes disciplinas científicas. Los mapas temáticos iniciales tuvieron un enfoque principalmente geológico, y sentaron la base para los primeros mapas de suelos con un enfoque más formalizado, el agrogeológico (Hartemink et al., 2013).

A partir del siglo XIX, se otorga una gran importancia al estudio de los suelos en diferentes partes del mundo, un ejemplo fue la expedición de Lewis y Clark por el río Missouri, en la que realizaron un inventario de tierras nuevas de los Estados Unidos. Sus observaciones incluyeron el color, salinidad, textura, fertilidad y fragmentos de roca de los suelos (Brevik y Hartemink, 2010). Esta expedición puede ser considerada el comienzo de un siglo con grandes avances en el entendimiento de los suelos.

Uno de los avances más significativos fue el surgimiento de la *geografía de suelos*, sus inicios se remontan a 1877 cuando el geólogo y geógrafo ruso Vasily Dokuchaev realizó investigaciones en Ucrania para buscar soluciones a la disminución de la producción agrícola (Rodrigo-Comino, et al., 2018). Con base en este estudio, Dokuchaev relacionó la distribución de los suelos con cinco factores de formación, y considerando al clima como el mejor pronosticador de su ubicación geográfica, en 1899 realizó el primer mapa del hemisferio norte de la Tierra con 11 unidades de suelo, en el cual reflejó sus opiniones sobre la zonalidad climática (Hartemink et al., 2013).

Dokuchaev dejó en claro que, a excepción del factor biológico, los factores formadores pueden funcionar de manera independiente. Sin embargo, no se refería a que el suelo es el resultado de un solo factor, sino que admitía que la importancia relativa de los factores varía y también hacía hincapié en que el suelo es la expresión de todos ellos (Crocker, 1952).

Además, Dockuchaev fue el primer científico en proponer una clasificación basada en la combinación de propiedades y procesos de formación de los suelos, diferenciando las características de origen geológico de las que son resultado de los factores formadores. Este

enfoque, denominado el principio genético, sigue siendo una guía para diversas clasificaciones de suelos nacionales en la actualidad (Gardi et al., 2014).

Más de medio siglo de trabajo en el suelo no añadió más factores de formación a la lista propuesta por Dokuchaev, hasta que en 1981 Gaucher propuso la integración de un nuevo factor de formación: el manejo humano. Las ideas de Dokuchaev estuvieron casi completamente ocultas para los pedólogos occidentales y europeos hasta la publicación del libro en alemán de Glinka en 1914, y de su traducción al idioma inglés por el investigador Curtis Marbut en 1927 (Crocker, 1952).

En 1941, el estadounidense Hans Jenny creó una ecuación, que se ajusta a la propuesta original de Dokuchaev, en la que define la constitución del suelo en función de cinco factores formadores: $s = f(c, l, o, r, p, t)$. Donde s corresponde al suelo, c/l es el clima, o son los organismos, p el material parental, r el relieve y t el tiempo. En esta ecuación, denominada *la ecuación fundamental de los factores de formación del suelo*, Jenny considera al suelo como un sistema dinámico abierto que puede ser definido si conocemos todas sus variables (Crocker, 1952; Solleiro y Gama, 2011)

A inicios del siglo XX ocurre un avance importante en la geografía de suelos debido principalmente a los estudios sobre pedogénesis y cartografía de suelos realizados por el geólogo y científico ruso Konstantin Glinka (Rodrigo-Comino et al., 2018). Konstantin Glinka elaboró el primer mapa de suelos del mundo en 1908, el cual incluía 18 unidades de suelo y una unidad de cuerpos de agua (Hartemink et al., 2013).

Los primeros intentos de introducir la línea de investigación de la escuela de suelos rusa a Estados Unidos tuvieron poca efectividad. Tal fue el caso de George N. Coffey, un empleado de la Oficina de Suelos que presentó estas ideas en las reuniones de la Sociedad Americana de Agronomía en 1908 sin llegar a un acuerdo (Brevik, 2005). Finalmente, la línea de investigación fue llevada hacia Estados Unidos por el investigador estadounidense Curtis Marbut, quien es considerado uno de los primeros geógrafos de suelos de fama mundial (Rodrigo-Comino, et al., 2018; Brevik et al., 2016).

A mediados de la segunda década del siglo XX surgieron avances metodológicos en la cartografía de suelos que, aunque son considerados estudios adelantados a su tiempo,

serían reconocidos posteriormente como los primeros pasos hacia un nuevo tipo de mapeo de suelos que surgiría en el siglo XXI (Minasny y McBratney, 2016). Uno de los primeros estudios de este tipo, efectuado en 1925, utilizó la detección proximal mediante un sensor de resistencia mecánica para realizar un mapa de alta resolución que permitió reconocer la importancia de la variación espacial de los suelos (Keen y Haines, 1925). Si bien la detección proximal de los suelos se formalizó hasta el año 2000, este estudio fue de los primeros en su tipo (McBratney y Minasny, 2010).

Por otro lado, en 1960, en el 7° Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo surge un trabajo que impulsó a la ciencia del suelo a la vanguardia de la agricultura (Mermut y Eswaran 2001). La Sociedad Internacional de Ciencias del suelo (ISSS) recomendó que se intentara armonizar y sintetizar los conocimientos del suelo del mundo en mapas a nivel de continentes y de grandes regiones (FAO, 2017).

Con base en esto, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) trabajaron durante 20 años para generar el primer mapa de suelos del mundo que presentó una clasificación y nomenclatura aceptadas internacionalmente (FAO y UNESCO, 1976), y que posteriormente llevaría a la creación de un sistema de clasificación de suelos, conocido como WRB (IUSS, 2015).

La FAO se fundó en 1945 mediante la firma de 44 naciones que se comprometieron a luchar contra el hambre, cuando a su vez, el mundo enfrentaba una devastación y escasez de alimentos derivada de la Segunda Guerra Mundial (FAO, 2021). Los estudios de los suelos de la FAO pueden remontarse a 1950 con el censo agropecuario mundial que proporcionó cifras comparables internacionalmente para definir la estructura de la agricultura (FAO, 2015a).

La ciencia del suelo se internacionalizó en gran medida en el siglo XX por el intercambio de científicos e ideas entre los países, y por el mapa de suelos y el sistema de clasificación mundial de la FAO-UNESCO (Brevik y Hartemink, 2010). Una aportación importante a la ciencia del suelo que se realizó a través de una colaboración internacional

fue el surgimiento de la disciplina conocida como etnopedología (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001).

La etnopedología nació a partir del trabajo realizado por la Dra. Bárbara J, Williams de la Universidad de Wisconsin y el Dr. Carlos Ortiz Solorio del Colegio de Posgraduados, en el cual, evaluaron el impacto de quinientos años de agricultura en el área de influencia de los Códices de Santa María Asunción y de Vergara en Tepetlaoxtoc y plantearon la poca reciprocidad que existe entre el concepto científico del suelo con el concepto de tierra de los campesinos (Williams y Ortiz-Solorio, 1981).

La etnopedología puede definirse como la ciencia que trata o estudia la sabiduría campesina sobre los suelos y sus formas de ubicarlos en el espacio, de ella surgió la cartografía de las clases de tierra campesina (Ortiz-Solorio et al., 1990). Se reconocen tres etapas del desarrollo de la etnopedología: 1) inicial, que va de 1978 a 1981; intermedio, de 1981 a 1987; y cartográfico, que continua hasta la actualidad (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001).

Por otro lado, a lo largo del siglo XX se desarrollaron también diversos sistemas de clasificación de suelos como resultado del interés en la conservación y gestión de este recurso, estos sistemas se basaron en dos aspectos: a) naturales, con una agrupación de acuerdo con las características ecológicas del suelo o procesos de desarrollo; y b) técnicos con una agrupación según el propósito específico de gestión de suelo (Gardi et al., 2014).

Algunos sistemas de clasificación funcionan con criterios cuantitativos para evaluar las características del suelo y asignar con precisión una clase de suelos jerárquica, entre los más reconocidos se encuentran la *Taxonomía de Suelos* de la USDA (Soil Survey Staff, 2006) y la *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo* (WRB) (IUSS, 2015).

A finales del siglo XX, gracias a la aplicación de las nuevas tecnologías de información que surgieron en este siglo, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), fue optimizado el manejo y presentación de la información de los levantamientos de suelos. Esto permitió la inclusión de métodos numéricos para el mapeo de suelos que raramente se utilizaban en el pasado y que hasta la fecha proporcionan un nuevo medio de control de calidad y validación de los datos (Mermut y Eswaran 2001; Gardi et al., 2014).

Este enfoque de mapeo de suelos surge en 1987, a partir de que JJ de Gruijter y Alexander McBratney proponen mediante una carta dirigida al Secretario General de la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo la posibilidad de establecer un grupo de trabajo sobre pedometría, el cual se enfocaría en el estudio de la clasificación, formación y distribución de los suelos mediante técnicas cuantitativas, matemáticas y estadísticas (McBratney, 1986).

En respuesta a su solicitud, el 18 de septiembre de 1988 se acordó la formación, con carácter provisional, de este nuevo grupo de trabajo. Posteriormente, en 1990 durante el Congreso Mundial de Ciencias del Suelo llevado a cabo en Japón, fue formalmente establecido (Pedometrics, 2018). Este grupo de trabajo tiene actualmente una amplia producción científica y está estrechamente relacionado con los trabajos del ahora reconocido mapeo digital de suelos.

El mapeo digital de suelos surge a inicios del siglo XXI, cuando un grupo de colaboradores del estudio de los suelos notan puntos en común en sus trabajos de mapeo de suelos en los que emplean modelos computacionales y numéricos. Con base en estos puntos en común, propusieron un nuevo método para la elaboración de mapas de suelos: *la función de predicción espacial del suelo con errores espacialmente autocorrelacionados (Scorpan-SSPFE)*, la cual posteriormente evolucionaría hacia el mapeo digital de suelos (McBratney et al., 2003; Minasny y McBratney, 2016).

El mapeo digital de suelos se establece formalmente en el 2003, a partir de la gran explosión de tecnologías de información y computo que llegó a múltiples áreas de estudio, incluyendo la ciencia del suelo (McBratney et al., 2003). De acuerdo con Minasny y McBratney (2016) los antecedentes del mapeo digital de suelos se remontan a trabajos científicos adelantados a su tiempo, que presentaban estudios sobre detección proximal (Keen y Haines, 1925; McBratney y Minasny, 2010) y espectroscopia de suelos (Mathews et al., 1973; Stoner y Baumgardner, 1981).

El primer taller mundial de mapeo digital de suelos se llevó a cabo en Francia en el 2004, después de este taller, se formó un grupo de trabajo de la Unión Internacional de Ciencias de Suelo (Minasny y McBratney, 2016). Posteriormente, durante el segundo taller

efectuado en el 2006 en Brasil se propuso el desarrollo de un nuevo mapa global de suelos, pero esta vez no de unidades taxonómicas, si no de propiedades de los suelos, en el cual se emplearía el enfoque del mapeo digital (Hartemink et al., 2010).

En la actualidad, el mapeo digital de suelos es considerado una subdisciplina exitosa de la ciencia del suelo que ha producido una serie de libros (Lagacherie et al., 2007; Hartemink et al., 2008; Boettinger, 2010) y una tasa de publicación de 12 artículos por año hasta el 2016 (Minasny y McBratney, 2016).

Finalmente, en el 2014 surge un nuevo concepto de las ciencias del suelo motivado por el desarrollo sostenible: la seguridad del suelo. Este concepto se basa en el reconocimiento de que los suelos son una parte integral de los desafíos de sostenibilidad ambiental global a través de sus funciones ambientales (McBratney et al., 2014).

Si bien el estudio de las funciones ambientales de los suelos surgió desde década de los 90's con la noción de incorporar a la clasificación tradicional de los suelos una evaluación de las funciones que los suelos pueden desempeñar, cambiando el énfasis de propiedades físicas y químicas hacia sus funciones (Bouma, 1989; Dobos et al., 2006). Es a través del concepto de seguridad del suelo donde se trasciende a una visión global que nos permite comprender la importancia del suelo a través de sus funciones que nos brindan servicios ecosistémicos.

Las funciones de los suelos son: fuente de materias primas, almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes y agua, reserva de carbono, reserva de la biodiversidad, entorno físico y cultural, archivo geológico e histórico, reactor ambiental, regulación del clima, regulación de inundaciones, y fuente de productos farmacéuticos y recursos genéticos (Bautista et al., 1995; CCE, 2006; Bouma, 2009; Lehmann et al., 2008; Pérez et al., 2013; FAO, 2015b; Gallegos et al., 2019).

1.7 Hibridación de los enfoques de la cartografía de suelos

Tanto el enfoque tradicional, como el digital de la cartografía de suelos tienen ventajas y desventajas. Por un lado, la cartografía de suelos tradicional involucra una amplia comprensión conceptual de los factores y procesos de formación de los suelos (FAO, 2012);

y por el otro, la cartografía digital da un enfoque cuantitativo a los mapas de suelos permitiendo su fácil reproducción y el cálculo de su precisión (McBratney et al., 2003). En este sentido, no es difícil vislumbrar en el futuro cercano la hibridación de ambos enfoques, aprovechando sus ventajas para la generación de mejores mapas de suelos.

En la figura 2 se muestran las fortalezas, oportunidades, debilidades y desventajas de ambos enfoques. La hibridación permitiría la generación de mapas: 1) con un enfoque cuantitativo, mediante modelos matemáticos sustentados teóricamente por conocimiento experto; 2) económicos, en términos monetarios y de tiempo; y 3) interpretativos, que presenten las funciones ambientales o servicios ecosistémicos de los suelos en lugar de grupos taxonómicos o propiedades aisladas.

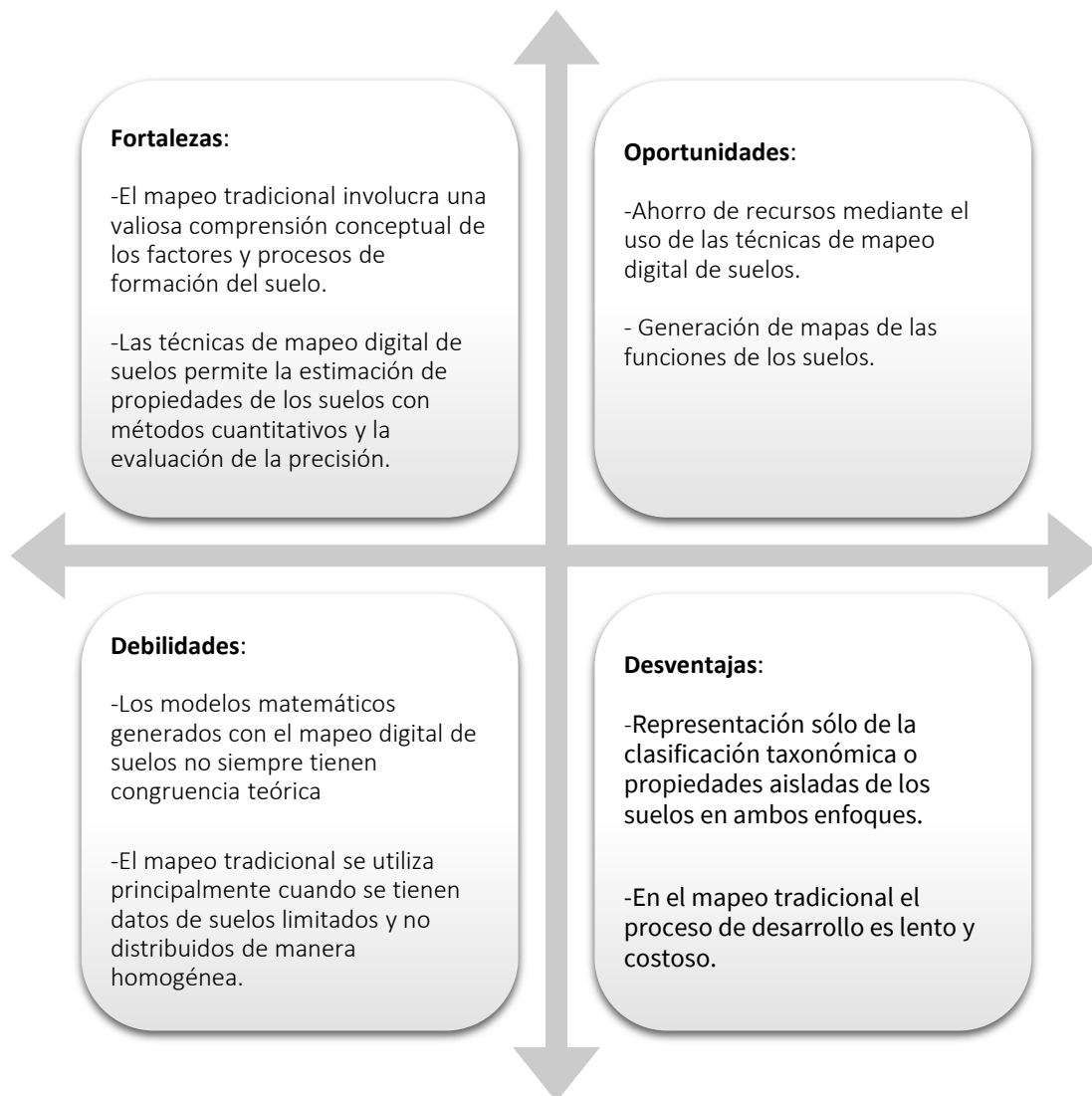


Figura 2. Análisis de los enfoques tradicional y digital del mapeo de suelos

1.8 Conclusiones del capítulo I

La cartografía de suelos ha evolucionado acorde con las herramientas y tecnologías disponibles en cada etapa de la historia, se ha avanzado desde la creación de mapas de paisaje en materiales efímeros, hasta mapas digitales de suelos generados utilizando potentes recursos computacionales.

Se puede reconocer que el conocimiento de los suelos siempre ha existido y que su integración con la cartografía ha sido fundamental para continuar con su desarrollo. Si bien los nuevos enfoques digitales de la cartografía de suelos representan un avance importante

para la generación de información de suelos de calidad con ahorro de recursos, no debe separarse de los conocimientos y métodos tradicionales que poseen un gran valor conceptual del desarrollo y distribución espacial de los suelos, sino más bien debe buscarse su integración.

Por otro lado, nuestra conciencia de la importancia del mantenimiento del recurso suelo se hace más fuerte, debido a la búsqueda del desarrollo sostenible de la humanidad, lo que nos lleva a valorar aún más la generación de información edafológica interpretada cartográficamente para hacer un buen uso del recurso suelo. En este sentido los dos enfoques: geopedología y cartografía digital, así como los enfoques híbridos permiten la elaboración de mapas más precisos y exactos.

1.9 Referencias del capítulo I

- Bautista, F., Luna, P. V. M., & Durán, C. (1995). El suelo, un reactor químico muy interesante. *Educación química*, 6(4), 226-230.
- Boettinger J.L., Howell D.W., Moore A.C., Hartemink A.E., Kienast-Brown S. (Eds). 2010. Digital Soil Mapping. *Progress in Soil Science*, Vol 2. Springer, Dordrecht
- Bouma, J. 1989. Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. In: Stewart B.A. (Eds.) *Advances in Soil Science*. *Advances in Soil Science*, Vol 9. Springer, New York, NY.
- Bouma, J. 2009. Soils are back on the global agenda: Now what?. *Geoderma*, 150, 224-225. DOI: 10.1016/j.Geoderma.2009.01.015
- Brevik, E. C., Calzolari, C., Miller, B.A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., Jordán, A., 2016. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma* 264, 256-274. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.06.011>
- Brevik, E. C. y Hartemink, A. E., 2010. Early soil knowledge and the birth and development of soil science. *Catena* 83(1), 23-33.
- Brevik, E. C., 2005. A Brief History of Soil Science, in: *Global Sustainable Development*, Theme 1.05: Land Use and Cover. W. Verheye (Ed.). *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO EOLSS Publishers, Oxford, UK.
- Brus, D. J., Stoorvogel, J. J., Heuvelink, G. B. M., de Vries, F., 2012. Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. *Soil Science Society of America Journal* 76, 2097-2115.

- Campbell, T. 1987. Portolan Charts from the Late Thirteenth Century to 1500. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 371-463, EUA: University of Chicago Press.
- Comisión de las Comunidades Europeas (CCE). 2006. Propuesta de directiva del parlamento europeo y del consejo por la que se establece un marco para la protección del suelo y se modifica la Directiva 2004/35/CE. Bruselas: Autor. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52006PC0232>
- Crocker, R. L., 1952. Soil Genesis and the Pedogenic Factors. *The Quarterly Review of Biology* 27(2), 139-168.
- Delano, C., 1987. Cartography in the Prehistoric Period in the Old World: Europe, the Middle East, and North Africa. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 54-101, EUA: University of Chicago Press.
- Delgado, E., Caretta, M., 2008. Imaginación y cartografía: un estudio sobre el proceso del descubrimiento americano. *Cuicuilco*. 15(43), 111-136.
- Dilke, O. A. W. 1987a. Cartography in the Ancient World: A Conclusion. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 276-279, EUA: University of Chicago Press.
- Dilke, O. A. W. 1987b. Maps in the Service of the State: Roman Cartography to the End of the Augustan Era. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 201-211, EUA: University of Chicago Press.
- Dilke, O. A. W. 1987c. Itineraries and Geographical Maps in the Early and Late Roman Empires. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 234-257, EUA: University of Chicago Press.
- Dobos, E., Carré, F., Hengl, T., Reuter, H.I., Tóth, G., (2006). Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN, 68 pp. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities. Available in: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR22123.pdf

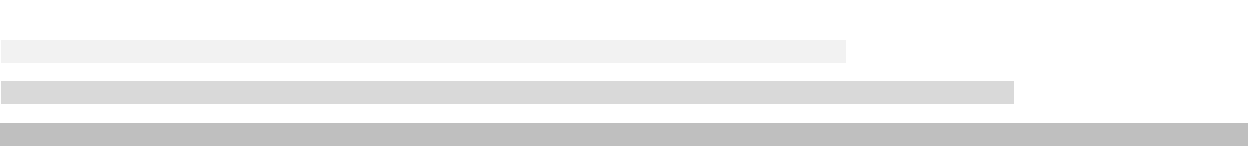
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 1976. Mapa mundial de Suelos 1:5 000 000 Volumen I Leyenda. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. Global soil partnership, technical report. State of the art report on global and regional soil information. Roma: Autor. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3161e.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015a. 70 aniversario de la FAO. <https://www.fao.org/70/1945-55/es/> (visitado 10 diciembre 2021).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015b. Los suelos proporcionan servicios ecosistémicos que permiten la vida en la tierra. <https://www.fao.org/resources/infographics/> (visitado 08 diciembre 2021).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. Mapas históricos de Suelos y Bases de datos. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/es/> (visitado 15 enero 2018).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2021. Construyendo la generación #HambreCero. <https://www.fao.org/building-the-zerohunger-generation/learning-paths/your-guide-to-fao/es/> (visitado 10 diciembre 2021).
- Gallegos, A., López-Carmona, D., Bautista, F. 2019. Quantitative Assessment of Environmental Soil Functions in Volcanic Zones from Mexico Using S&E Software. *Sustainability*, 11(17), 4552.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (Eds.). 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg.
- Grunwald S. (2010) Current State of Digital Soil Mapping and What Is Next. In: Boettinger J.L., Howell D.W., Moore A.C., Hartemink A.E., Kienast-Brown S. (Eds.) *Digital Soil Mapping. Progress in Soil Science*, vol. 2. Springer, Dordrecht.
- Guerrero, G., y Cruz, C.O., 2011. Cartografía y mapas edáficos en México .En: Krasilnikov, P., Jiménez, F. J., Reyna, T., García, N. (Eds.), *Geografía de suelos de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias., México, pp. 211-216.

- Hale, J. 2007. Warfare and Cartography, ca. 1450 to ca. 1640. En Woodward, D. (Ed.). The History of Cartography, Volume 3, Cartography in the European renaissance pp. 719-737, EUA: University of Chicago Press.
- Harley, J. B., Woodward, D., Aujac, G. 1987a. The Foundations of Theoretical Cartography in Archaic and Classical Greece. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean pp. 130-147, EUA: University of Chicago Press.
- Harley, J. B., Woodward, D., Aujac, G. 1987b. The Growth of an Empirical Cartography in Hellenistic Greece. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean pp. 148-160, EUA: University of Chicago Press.
- Harley, J. B., Woodward, D., Aujac, G. 1987c. Greek Cartography in the Early Roman World. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean pp. 161-176, EUA: University of Chicago Press.
- Harrell, J. A., Brown, V. M. 1992. The World's Oldest Surviving Geological Map: The 1150 B.C. Turin Papyrus from Egypt. *The Journal of Geology*, 100 1, 3-1.
- Hartemink A.E., McBratney A., Mendonça-Santos M. (Eds). 2008. *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer, Dordrecht
- Hartemink, A.E., Hempel, J., Lagacherie, P., McBratney, A., McKenzie, N., MacMillan, R.A., Minasny, B., Montanarella, L., Mendonça-Santos, M.L., Sanchez, P., Walsh, M., Zhang, G., 2010. GlobalSoilMap.net – A New Digital Soil Map of the World, in: Boettinger, J.L., Howell, D.W., Moore, A.C., Hartemink, A.E., Kienast-Brown, S. Eds., *Digital Soil Mapping. Progress in Soil Science* Springer, Dordrecht, pp 423-428.
- Hartemink, A.E., Krasilnikov, P., Bockheim, J.G. 2013. Soil maps of the world. *Geoderma*, 207-208, 256-267. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.003>
- Hartemink, A.E. & McBratney, A.B. 2008. A soil science renaissance. *Geoderma*, 148, 123– 129.
- Hsu, M. 1978. The Han maps and early Chinese cartography. *Annals of the association of American geographers*, 681, 45-60.
- Hsu, M. 1993. The Qin Maps: A Clue to Later Chinese Cartographic Development. *Imago Mundi*, 45, 90-100. <http://www.jstor.org/stable/1151164>

- IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources. 2015th ed.; World Soil Resources Reports No. 106; World Soil Resources: Rome, Italy.
- Kain, R. J. P. 2007. Maps and Rural Land Management in Early Modern Europe. En Woodward, D. (Ed.). The History of Cartography, Volume 3, Cartography in the European renaissance pp. 705-718, EUA: University of Chicago Press.
- Keen, B. A., Haines, W. B. 1925. Studies in soil cultivation. I. The evolution of a reliable dynamometer technique for use in soil cultivation experiments. The Journal of Agricultural Science, 153, 375-386.
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. C., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Solleiro-Rebolledo, E. 2013. The Soils of México. Dordrecht: Springer.
- Krasilnikov, P., 2011. Distribución espacial de los suelos y los factores que la determinan, en: Krasilnikov, P., Jiménez, F. J., Reyna, T., García, N. (Eds.), Geografía de suelos de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias., México, pp. 1-39.
- Lagacherie P. 2008. Digital Soil Mapping: A State of the Art. In: Hartemink A.E., McBratney A., Mendonça-Santos M. (Eds.) Digital Soil Mapping with Limited Data. Springer, Dordrecht
- Lagacherie, P., McBratney, A. B., Voltz, M., 2007. Digital Soil Mapping: An introductory perspective. Progress in Soil Science, Vol. 31. Springer, Dordrecht.
- Lehmann, D.; David, S.; Stahr, K. 2008. TUSEC-Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils; Universitat Hohenheim Bodenkundliche Hefte: Stuttgart, Germany. ISSN 0942-0754.
- Mathews, H., Cunningham, R., Petersen, G., 1973. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 37, 421–424.
- McBratney, A. B., Mendonça-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. Geoderma 117 1-2, 3-52.
- McBratney, A.; Field, D.J.; Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. Geoderma, 213, 203–213.
- McBratney, A.B., Minasny, B. 2010. The sun has shone here antecedently. In: Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., Minasny, B. Eds., Proximal Soil Sensing. Springer, Netherlands, pp. 67–75.
- McBratney, A. B. 1986. Introduction to Pedometrics. A course of lectures. CSIRO Division of Soils Technical memorandum 53/1986. CSIRO Division of Soils, Glen Osmond, South Australia. 150p.

- Mermut, A. R., y Eswaran, H., 2001. Some major developments in soil science since the mid-1960s. *Geoderma* 100(3-4), 403-426.
- Millard, A. R. 1987. Cartography in the ancient near east. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 107-116, EUA: University of Chicago Press.
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2014. The historical role of base maps in soil geography. *Geoderma* 230-231, 329-339.
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2016. History of soil geography in the context of scale. *Geoderma* 264, 284-300.
- Minasny, B., McBratney, A. B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
- Ortiz-Solorio, C. A., Pájaro-Huertas, D., Ordaz-Chaparro, V. M. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología15. Centro de Edafología, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México.
- Pedometrics. 2018. History. Available in: <http://pedometrics.org/the-history-of-pedometrics/> accessed on 25 June 2018.
- Pérez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F. & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1) 157-173. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.06.042
- Rodrigo-Comino, J., Senciales, J. M., Cerdà, A., Brevik, E. C. 2018. The multidisciplinary origin of soil geography: A review. *Earth-Science Reviews*, 177, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.008>
- Roecker S., Howell D., Haydu-Houdeshell C., Blinn C., 2010. A Qualitative Comparison of Conventional Soil Survey and Digital Soil Mapping Approaches, in: Boettinger J.L., Howell D.W., Moore A.C., Hartemink A.E., Kienast-Brown S. (Eds) *Digital Soil Mapping. Progress in Soil Science*, Vol. 2. Springer, Dordrecht.
- Shore, A. F. 1987. Egyptian Cartography. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 117-129, EUA: University of Chicago Press.


- Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture. Washington, D.C.
- Stoner, E.R., Baumgardner, M., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1161–1165.
- Thrower, N.J.W., 2007. *Maps and Civilization: Cartography in Culture and Society*. Third Ed. University of Chicago Press, Chicago.
- U. S. Department of Agriculture (USDA). 1960. Land-Capability Classification. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Utrilla, P., Mazo, C., Sopena, M.C., Martínez-Bea, M., Domingo, R. 2009. A palaeolithic map from 13,660 calBP: engraved stone blocks from the Late Magdalenian in Abauntz Cave Navarra, Spain. *Journal of Human Evolution*, 572, 99-111.
- Williams, B. J., Jorge, M.C. 2008. Aztec Arithmetic Revisited: Land-Area Algorithms and Acolhua Congruence Arithmetic. *American Association for the Advancement of Science*, 320 5872, 72-77. <https://doi.org/10.1126/science.1153976>
- Williams, B. J., y Ortiz, C. A. 1981. Middle American folk soil taxonomy. *Annals Association of American Geographers* 71(3): 335-358.
- Woodward, D., 1987. Medieval Mappaemundi. En Harley, J. B., Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 1, Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* pp. 286-370, EUA: University of Chicago Press.
- Woodward, D. 2007. Cartography and the Renaissance: Continuity and Change. En Woodward, D. (Ed.). *The History of Cartography, Volume 3, Cartography in the European renaissance* pp. 3-24, EUA: University of Chicago Press.
- Zinck, A. 2016. The Geopedologic Approach. In: Zinck J.A., Metternicht G., Bocco G., and Del Valle H.F. (Eds) *Geopedology*. Springer, Cham.



Capítulo II. Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico

Artículo publicado en Geoderma Regional

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00403>





Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico



Ángeles Gallegos^{a,*}, Felipe García-Oliva^b, Alberto Pereira-Corona^c, Francisco Bautista^{a,*}

^a Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190 Morelia Michoacán, Mexico

^b Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190 Morelia Michoacán, Mexico

^c División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía esq. Ignacio Comonfort s/n, Colonia del Bosque, 77019 Chetumal, Quintana Roo, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:
Received 18 November 2020
Received in revised form 4 May 2021
Accepted 6 May 2021

Keywords:
Andosols
Cambisols
Digital photography
Soil color
Color systems

ABSTRACT

In this study, we developed a method that allows the delimitation of horizons and the quantification of coarse fragments in soil profiles from volcanic areas using digital images. The delineation of the soil profile horizons included the following phases: pre-processing of the digital image, extraction of color systems from the pre-processed image, k-means segmentation of the HSV and CIE L*a*b* color systems, delineation of the horizons, and determination of the horizon characteristics. The coarse fragments were quantified in the following three phases: superpixel analysis of the soil profile image, histogram classification of the image objects, and extraction and quantification of the coarse fragments. For horizon delineation, the HSV color system performed better for the Eutric Andic Cambisol (Loamic, Ochric), and the CIE L*a*b* system performed better for the Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic). The RGB image and the S component of the HSV system demonstrated similar coarse fragment volume calculation performance for the Eutric Andic Cambisol (Loamic, Ochric), whereas the S component worked best for the Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic). We created a graphic decision-making system for the delineation of soil horizons and for the quantification of coarse fragments in digital images of soil profiles.

© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

Soil science began with the observation of soil profiles and their morphologies, as evidence of the formation factors and pedogenetic processes that cause soil diversity (Zhang and Hartemink, 2019). The history of soil and the environment can be inferred from the soil profile morphology and further elucidated by soil horizon properties.

For many years, various soil properties, such as horizon delineation and the percentages of coarse fragments and specks, have been evaluated qualitatively or semi-quantitatively (Schoeneberger et al., 2012; IUSS Working Group WRB, 2015).

Modern technologies, including proximal soil sensors (Ali Aldabaa et al., 2015; Bautista et al., 2016; Duda et al., 2017), computing resources, information, and communication technology (Gallegos et al., 2019), have been used to improve the quantification of soil profile properties (Hartemink and Minasny, 2014; Hartemink, 2015) and, thus, to improve sustainable land management (Herrick et al., 2016; Gallegos et al., 2019).

The thickness of the horizons and the percentage of coarse fragments are the physical properties essential for converting the physical and chemical properties of soil into surface units (pedo-ecological evaluation) (Bautista et al., 2016; Gallegos et al., 2016; Bedolla-Ochoa et al., 2018). The evaluation of both properties is qualitative (based on the opinion of an expert).

New digital cameras, modern color measurement systems, and information-managing software have been used to improve the quantification of objects in soil profiles and to delineate horizons (Hartemink and Minasny, 2014; Hartemink, 2015).

For example, Zhang et al. (2019) developed a rapid and quantitative method using digital images and the ImageJ software to determine the content and shape characteristics of the coarse fragments of an Alfisol. Jiang et al. (2020) developed a profile imaging method for estimating coarse fragment concentrations and found that the method could be used efficiently in a natural, gravelly soil profiles with low contrast.

Gholizadeh et al. (2020) investigated the utility of a low-cost digital camera and Sentinel-2 data compared to common reflectance spectroscopy to estimate soil organic carbon using color spaces and color indices as covariates. O'Donnell et al. (2010) developed a rapid, non-destructive, and accurate method for the identification and quantification of soil redoximorphic features from soil cores using a digital camera

* Corresponding authors.

E-mail address: leptosol@ciga.unam.mx (F. Bautista).

and image classification software. However, the cataloging and management of photographs of a great variety of soils worldwide is just beginning.

The objective of this study was to develop a method allowing the identification of horizons and the quantification of the percentage of coarse fragments of volcanic soil profiles using digital images.

2. Materials and methods

2.1. Study zone

The Trans-Mexican Neo-volcanic Axis is a physiographic province that was formed as a result of continuous intense volcanic activity over the course of more than a million years (Ihl, 2019). The highest mountainous and volcanic units in Mexico, such as the Pico de Orizaba (5610 masl), Iztaccíhuatl (5230 masl), and Popocatepetl (5465 masl) are located in this physiographic province (INECC, 2007).

The Trans-Mexican Neo-volcanic Axis is characterized by multiple closed water basins due to recent volcanism that formed large lakes, including Pátzcuaro, Zirahuén, and those of the Valley of Mexico (De la Torre, 2003). The soils are of low pedogenetic development; the amorphous allophane-type material content produces potential high-productivity properties, such as low bulk density, high porosity, high organic matter content, and a high water retention capacity (Nanzayo, 2002).

The Sierra Madre del Sur is a mountain range that extends from northwest to southeast parallel to the southern Pacific coast of Mexico (Fig. 1). This physiographic province contains dry and temperate tropical forests, warm climates with summer rains, and different soil types (e.g., Leptosols, Luvisols, Vertisols, and Gleysols) (Bedolla-Ochoa et al., 2019; Ihl, 2019).

Images of a Eutric Andic Cambisol (Loamic, Ochric) and a Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic) were used to develop the method, and 18 soil profiles were used to test its operation.

The Cambisol is located in the Sierra Madre del Sur, at UTM coordinates 266,364.625 (X) and 2,190,845.4 (Y) 14 N zone. The soil profile is on a high hill with a 2° slope and has no current management. The climate is warm and subhumid. The Andosol is located in the Trans-Mexican Neo-volcanic Axis, at UTM coordinates 237,127.81 (X) and

2,174,538.75 (Y) 14 N zone. The soil profile is on the upper part of a hill with a 17° slope; the profile has a high degree of naturalness, volcanic ash parent material, and no current management. The vegetation cover is a pine-oak forest native to the region, and the climate is temperate subhumid with summer rain.

2.2. Image acquisition

The soil profiles were sampled using a pedological pit. The structure, color, root density, and coarse fragment volume were determined in the field (Siebe et al., 2006; FAO, 2009; Schoeneberger et al., 2012). Electrical conductivity; pH (SEMARNAT, 2002); organic matter (Nelson and Sommers, 1982); cation exchange capacity; exchangeable cations (Rhoades, 1982); and percentages of sand, silt, and clay (Day, 1965) were measured in the laboratory. The soil profiles were classified based on the standards of the World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2015).

The color changes in the Cambisol were used to delimit two horizons in the field (from 0 to 15 cm and from 15 to 113 cm). The identified bulk density horizons were: A (0–9 cm), B1 (9–15 cm), Bw (15–72 cm), and B2 (72–113 cm). The three Andosol horizons were delimited based on color (from 0 to 29 cm, 29–65 cm, and 64–163 cm); four horizons were identified by considering the root density and coarse fragments volume: Ah (0–29 cm), Bw1 (29–65 cm), Bw2 (65–104 cm), and BC (104–163 cm) (Table 1).

Photographs of the soil profiles captured by the authors and others inherited from Series II of the soil profile database of the National Institute of Statistics and Geography were used (Table 2) (INEGI, 2013).

Photographs of the soil profiles captured by the authors were taken by reducing the surface roughness with a brush and using direct sunlight to obtain good lighting (Más-Martínez et al., 2011). A Canon PowerShot SX530 camera with auto-mode activation was used. In the auto mode, appropriate settings were automatically selected to obtain optimal focus, object brightness, and color (Ortiz et al., 2014).

The photographs were captured by positioning the camera perpendicular to the face of the soil profile and focusing on the entire depth of the pit (Ortiz et al., 2014). The target area of the photographs was delimited using the cropping function of Adobe Photoshop CS6 (Adobe, 2012).



Fig. 1. Study site location.

Table 1
Properties of soil profiles used for the development of the method.

Soil	Horizons	Depth (cm)	Coarse Fragments (%)	pH	Textural class %		
					Sand	Silt	Clay
CM	A	0–9	0	7.4	46.4	27.4	26.2
	B1	9–15	1	7.6	53.0	26.5	20.6
	Bw	15–72	2	7.7	39.1	27.6	33.3
AN	B2	72–113	0	7.8	43.2	23.3	33.5
	Ah	0–29	2	6.3	4.3	66.5	29.3
	Bw1	29–65	2	6.7	4.0	63.2	32.9
	Bw2	65–104	5	7.3	5.1	56.0	38.9
	BC	104–163	40	6.9	4.4	65.0	30.7

CM = Cambisol; AN = Andosol.

The color of the soil profile photographs corresponded to that of the three-dimensional system RGB system that represents color using light beams. The RGB system is based on the Cartesian coordinate system that works through addition and describes colors based on the presence or absence of red, green, and blue. Thus, color (0,0,0) represents a total absence (black), and the color (255, 255, 255) represents white (González and Woods, 2008).

The profile photographs were 16-megapixel .png images with an 8-bit depth for each band of the color system. The color per pixel representation of the image was 24 bits or 256 different tones per band. The resolution of the images was 150 pixels per inch. The sizes and resolutions for the Cambisol and Andosol profiles were 1893 × 2740 and 1380 × 2316 pixels and 24.24 and 14.18 pixels per cm, respectively.

2.3. Horizon delineation

To enhance the color differences between the horizons of the soil profiles, k-means segmentation preprocessing was used in the original RGB images (Fig. 2) and executed using the `imsegkmeans` and `labeloverlay` functions from MATLAB version R2018b.

For image processing, file browsers were created using the `fullfile` and `imgetfile` functions. The resulting images were stored in the same size as the original image.

CIE L*a*b* and HSV—device-independent color systems that are perceptually more uniform and suitable for the representation of the color of an object through numerical notation—were used to extract the color characteristics of the images and to perform more precise perceptual calculations (Plataniotis and Venetsanopoulos, 2000). In the CIE L*a*b* color system, L* represents the brightness of the image with a range from 0 (black) to 100 (white); a* and b* provide color information coordinates that indicate variation from green⁻ to red⁺ and from blue⁻ to yellow⁺, respectively (CIE, 1977; Plataniotis and Venetsanopoulos, 2000).

The HSV color measurement system belongs to the group of hue-oriented color coordinate systems that most closely correspond to human color perception. H (hue) is the portion of color that varies from 0 to 1 (or 0 to 360°) in a color wheel; S (saturation) refers to the amount of gray in the color, from 0% (gray) to 100% (primary color); and V (value) represents the brightness or intensity of the color, from 0% (black) to 100% (bright color) (Reiter, 2004).

Two functions were generated for the conversion of the images to each color system: 1) the `rgb2lab` function was used for the conversion to CIE L*a*b*, and the elements of the arrangement were stored and reconstructed as images from the positions L(:, :, 1), a(:, :, 2), b(:, :, 3); 2) the `rgb2hsv` function was used for conversion to HSV, and the array elements were stored and displayed as images with the `imshow` and `imwrite` functions.

The unsupervised k-means classification method was used to segment the CIE L*a*b* and HSV color system images (Zhang and Hartemink, 2019). The segmentation of an image implies its division into different connected but not overlapping regions. K-means

segmentation is based on clustering, which refers to the distribution of a large dataset into smaller, similar datasets (Mythili and Kavitha, 2012).

The k-means algorithm works by grouping a number *n* of objects (represented here by the pixels of the image) as a function of *k* groupings, defined here by the number of horizons in the profile. The number of *k* is always less than *n*, and *k* is always a positive integer. In general, *k* is created as a function by minimizing the sum of the distances between the centroid of the clusters and the objects in the image (Rakib et al., 2017).

The k-means segmentation process designates the number of clusters that can be formed based on the similarity of the objects in the image. For the analyzed profiles, the number of clusters corresponds to the number of horizons delimited in the field. A dialog box was generated with the input command to indicate the number of clusters and iterations of the k-means analysis.

A k-means segmentation function was developed for each color system. The functions performed the k-means analysis and the segmentation of the clusters using the k-means command and the `for-end` loop.

An interface was generated to allow the selection of the color system groupings that best delimit the horizons of the profiles. The feature extraction process was performed as described by Zhang and Hartemink (2019). The `fit` (smoothing spline) and `plot` functions were used for smoothing and overexposing the boundaries.

In the feature extraction from the Cambisol image, cluster three was used to delimit the surface horizon; the upper, left, and right edges of cluster two were removed to delineate a lower limit similar to that of the B1 horizon; cluster one was used to extract a horizon similar to B2. The parameters that best smoothed the horizon limits were 0.00001 for horizon A and 0.0000001 for horizon B.

In the feature extraction from the Andosol image with the CIE L*a*b* color system, cluster three was used to draw an upper limit similar to that of the BC horizon; and cluster one was used for the Ah horizon. The lower limit of cluster one and the upper limit of cluster three delimited the Bw horizon. For the HSV system, clusters four and three were used for the Ah and Bw horizons, respectively. The lower limit of cluster three delimited the BC horizon (Fig. 3). The smoothing parameter for the limits of these horizons was 0.000000001.

ImageJ software was used to determine the depth, distinctness, and topography of the horizons. The first step in determining the horizon features was the spatial calibration of the profile image. The calibration involved changing the pixels of the image by a known value in centimeters, using the total depth of the profiles described in the field as a reference.

A straight line was drawn with the line selection tool that included the entire depth of the profile image; the 'set scale' option was selected from the 'analyze' menu, and the dimension and unit of measurement were entered in the known distance box (González, 2018). After image calibration, the depths of the horizons and the depth and width of the ridges of the delineated limits were measured.

The distinctness and topography of the horizons were defined based on Schoeneberger et al. (2012). Distinctness refers to the thickness of the area of the horizon boundary that does not overlap with the boundary of an adjacent horizon. The topography indicates the contrast of the depth variation of the limit.

Because most soil boundaries are transition zones rather than point division lines, the depth of the horizons was calculated as the mean transition zone value (FAO, 2009).

2.4. Coarse fragments

The processing of the soil profile images to calculate the amount of coarse fragments was performed: 1) in a supervised manner, previously highlighting the coarse fragments in the original RGB image, and b) in an unsupervised manner using the original image in RGB and the image of the saturation component (S) of the HSV color system. This is

Table 2
Description of the 18 soil profiles used for the test of the method.

ID	Reference soil group	Characteristics	Location	Image source	Field description		
					Horizon	Depth (cm)	RF (% Vol.)
AL1	Alisol	Soils enriched in clays in the subsurface, with clays of high activity and low base saturation	747,404.00 (X) 2,065,755.00 (Y) 13 N	INEGI (2013)	A Bt1 Bt2 Bt3	0-22 22-43 43-72 72-102	28 60 60 85
AN1	Andosol	Soils that develop in volcanic ejecta rich in glass or any other material rich in silicate	807,927.56 (X) 2,184,911.75 (Y) 13 N	Authors	Ah Bw C	0-40 40-79 79-142	30 40 70
AN2	Andosol	Soils that develop in volcanic ejecta rich in glass or any other material rich in silicate	328,228.84 (X) 2,189,122.25 (Y) 14 N	Authors	Ah1 Ah2 CBw1 CBw2 C 2C1 2C2 2C3 3C 4CA	0-34 34-44 44-67 67-79 79-86 86-97 97-120 120-143 143-176 176-218	15 30 60 40 30 25 60 75 30 10
AN3	Andosol	Soils that develop in volcanic ejecta rich in glass or any other material rich in silicate	202,947.14 (X) 2,175,742.50 (Y) 14 N	Authors	A B1 B2 B3 B4	0-20 20-51 51-87 87-129 129-162	0 0 0 0 0
AN4	Andosol	Soils that develop in volcanic ejecta rich in glass or any other material rich in silicate	199,984.39 (X) 2,171,730.00 (Y) 14 N	Authors	Ap B1 B2 B3	0-14 14-56 56-106 106-169	0 0 1 0
AN5	Andosol	Soils that develop in volcanic ejecta rich in glass or any other material rich in silicate	207,175.25 (X) 2,186,290.75 (Y) 14 N	Authors	Ah Bw1 Bw2 Bw3 Bw4 C	0-12 12-28 28-53 53-78 78-104 104-140	0 5 20 2 2 80
CM1	Cambisol	Soils with formation of at least one subsurface horizon incipient	747,644.00 (X) 2,014,518.00 (Y) 13 N	INEGI (2013)	A Bw B1 B2	0-25 25-50 50-75 75-100	0 0 0 0
CM2	Cambisol	Soils with formation of at least one subsurface horizon incipient	254,503.00 (X) 2,173,804.00 (Y) 14 N	INEGI (2013)	A1 A2 Bw1 Bw2 Bw3 Bw4 C	0-15 15-30 30-50 50-75 75-100 100-135 135-176	0 0 0 0 0 0 0
CM3	Cambisol	Soils with formation of at least one subsurface horizon incipient	211,840.64 (X) 2,187,352.75 (Y) 14 N	Authors	Ah Bw1 Bw2 C	0-18 18-59 59-89 89-127	0 60 40 25
CM4	Cambisol	Soils with formation of at least one subsurface horizon incipient	226,762.42 (X) 2,181,480.75 (Y) 14 N	Authors	Ah B Bx CBm	0-18 18-66 66-107 107-152	0 2 0 70
KS1	Kastanozem	Soils with pronounced accumulation of organic matter in the surface mineral soil, dark, with secondary carbonates	286,990.00 (X) 2,189,708.00 (Y) 14 N	INEGI (2013)	A Bk Ck1 Ck2	0-30 30-60 60-90 90-125	0 0 0 0
LV1	Luvisol	Soils enriched in clays in the subsurface, with clays of high activity and high base saturation	228,113.43 (X) 2,179,897.25 (Y) 14 N	Authors	Ah Bt B1 B2 B3 Bx	0-15 15-46 46-63 63-81 81-113 113-150	0 0 1 5 15 15
PH1	Phaeozem	Soils with accumulation of organic matter, no secondary carbonates, high base saturation	296,580.00 (X) 2,149,747.00 (Y) 14 N	INEGI (2013)	A CR1 CR2	0-45 45-85 85-120	0 0 0
RG1	Regosol	Poorly developed soils in unconsolidated materials	259,183.35 (X) 2,114,262.75 (Y) 14 N	Authors	Ah A C R	0-6 6-18 18-47 47-80	10 20 80 100
RG2	Regosol	Poorly developed soils in unconsolidated materials	259,076.39 (X) 2,114,331.25 (Y) 14 N	Authors	Ah A R	0-35 35-65 65-80	25 50 100

Table 2 (continued)

ID	Reference soil group	Characteristics	Location	Image source	Field description		
					Horizon	Depth (cm)	RF (% Vol.)
SC1	Solonchak	Soils that have a high concentration of soluble salts	632,049.00 (X) 2,069,278.00 (Y) 13 N	INEGI (2013)	A	0–24	0
					Bw1	24–45	0
					Bw2	45–63	0
					Bw3	63–85	0
ST1	Stagnosol	Soils with stagnant water, periodically show reducing conditions that result in stagnic properties	259,471.30 (X) 2,165,695.80 (Y) 14 N	Authors	Ap1	0–27	1
					Ap2	27–38	1
					B1	38–53	1
					B2	53–72	1
					B3	72–82	1
					Bg	82–100	1
UM1	Umbrisol	Soil with accumulation of mineral surface organic matter and low base saturation	190,411.68 (X) 2,168,620.50 (Y) 14 N	Authors	Ah	0–26	0
					B1	26–59	0
					B2	59–94	0
					BC	94–110	50

because the S component highlights the contrast between the objects in the profile (coarse fragments and roots) and the fine soil matrix (Jiang et al., 2020).

To eliminate the texture of the images and to highlight the differences in color between the objects, a grouping was performed based on color entities using superpixels, which divide the image into regions with boundaries that consider information on the edges of objects. The function used for the superpixel analysis was based on the simple linear iterative clustering algorithm proposed by Achanta et al. (2012).

The superpixel analysis was performed as follows: 1) the original RGB image was converted to the CIE L*a*b* color system with the

rgb2lab function; 2) the superpixel over-segmentation of the CIE L*a*b* image was calculated using the superpixel function; 3) the mean color of each superpixel region was determined using the mean color function; 4) the mean color of each superpixel region was grouped using the image means function; and 5) the mean colors in the groupings were applied to display the image with natural colors (The MathWorks, Inc., 2020).

Histograms were used to plot the gray intensity distribution and to identify the objects in the images. The MATLAB imhist function was run to create a histogram plot with equally spaced bins, which represent the intervals of gray levels and the number of pixels within each interval of the superpixel analysis images of the soil profiles.

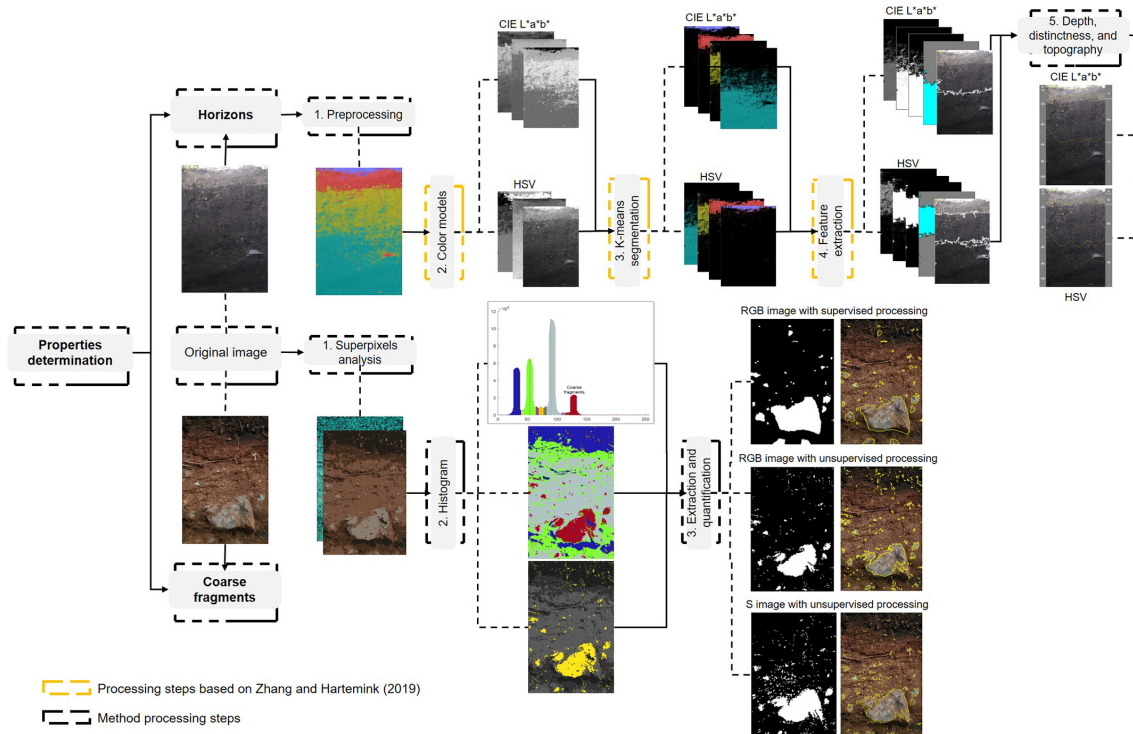


Fig. 2. Methodology flow chart.

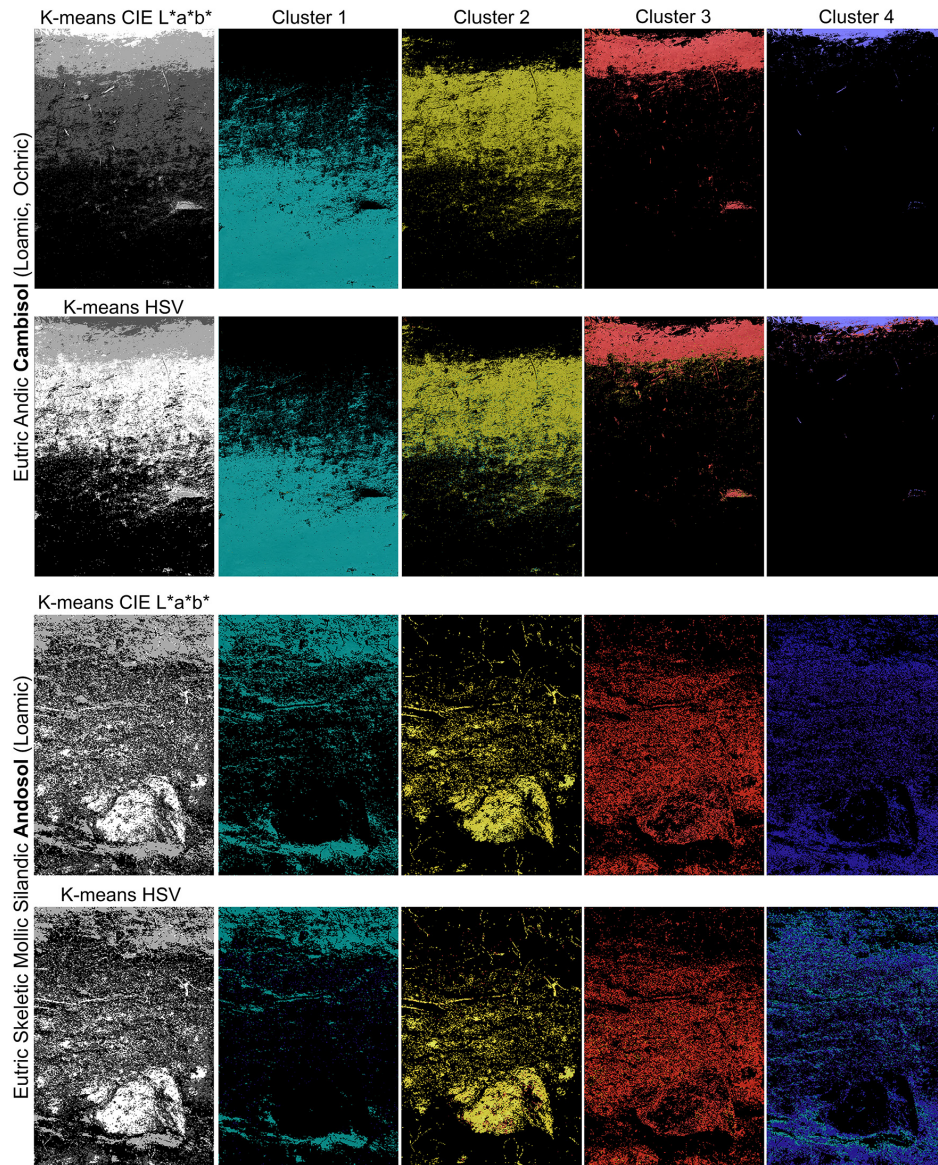


Fig. 3. Clusters extracted from the k-means segmentation of the original RGB Cambisol and Andosol images.

The histogram was used for the heuristic identification of the gray value that best represented the coarse fragments in the images (VRF). To differentiate the objects from the images, the false maxima and minima were eliminated from the histogram by applying a filter to the median. The modes of the histogram were considered as objects, and the separation threshold between objects was defined by the minimum value of the histogram peaks.

After VRF identification, a new histogram was generated showing the object that represents the labeled coarse fragments, such that each object separated by the threshold with a value similar to the VRF might correspond to a coarse fragment. Additionally, the regions of the superpixel image were classified by considering that each pixel

with a value similar to that of the VRF might be part of a coarse fragment.

To classify objects using the histogram, the following functions were used: 1) `rgb2gray` for the conversion of the image from the superpixel analysis to grayscale; 2) `imhist` to calculate the histogram of the grayscale image; and 3) `for-end` and `if-end` to classify the regions by comparing the VRF with each pixel of the image.

A binary image of the regions corresponding to the VRF-classified objects was created using the `imbinarize` function. The `imfill` function was used to fill the empty spaces in the objects. The `bwboundaries` function was used to draw the object boundaries, and the `bwareaopen` function was used to remove objects smaller than 100 pixels.

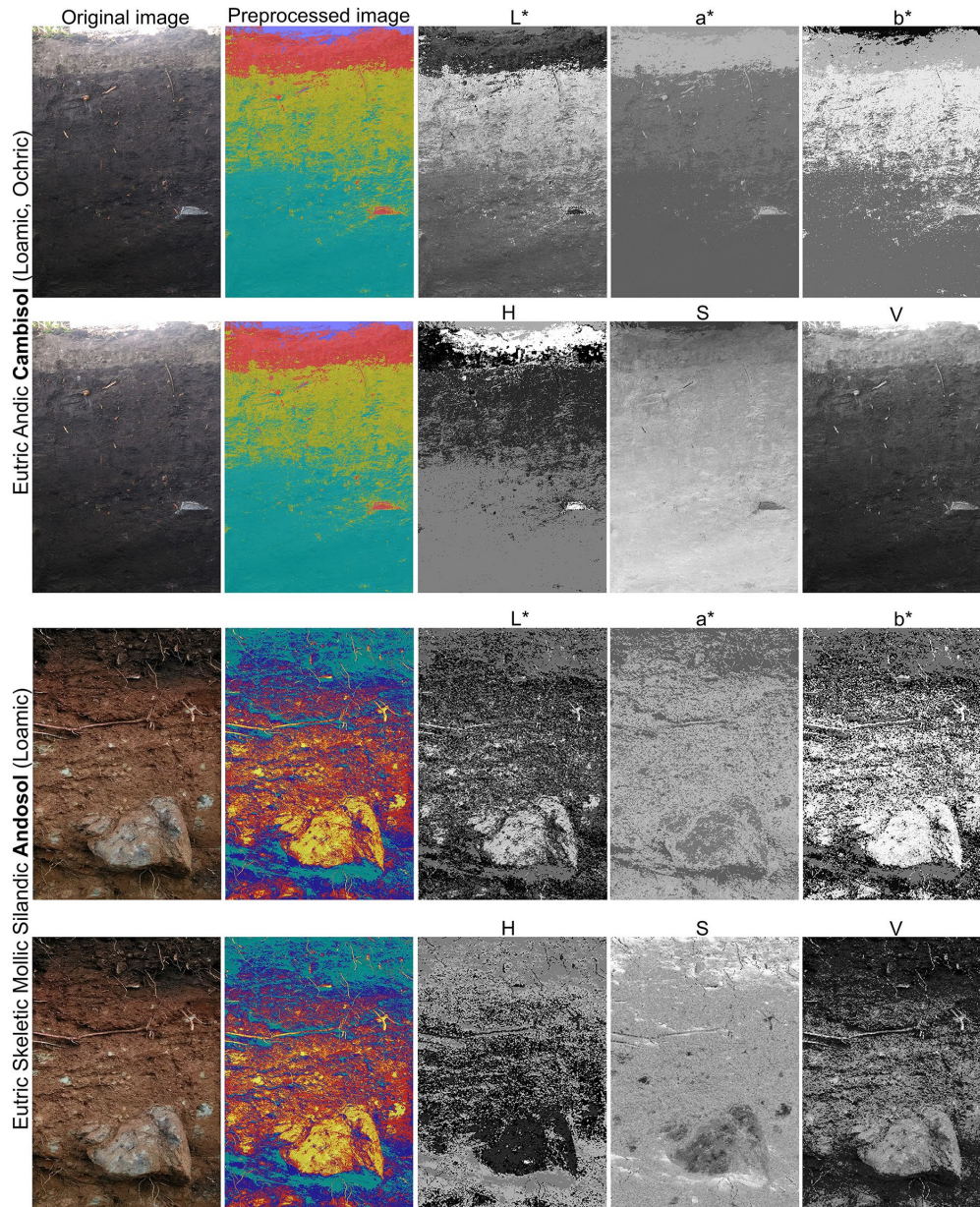


Fig. 4. CIE L*a*b* and HSV information extraction from the preprocessed images of the Cambisol and Andosol.

The identification of the Andosol coarse fragments was conducted as follows: 1) objects with areas larger than 800 pixels were labeled coarse fragments; 2) because the VRF detected coarse fragments and roots, objects with a roundness value larger than 0.60 were excluded.

For the Cambisol coarse fragments, the roundness of the objects was defined as greater than 0.16. The bwareafilt function was used to extract connected pixels ranging from 4000 to 20,000, because parts of the surface horizon (which had a color similar to that of the coarse fragments) were plotted on the binary image.

The functions used for coarse fragment identification were bwboundaries for tracing the outer edges of the objects, regionprops for proper object measurement, and the if-end conditional for object discrimination.

The total area of the images in the pixels was calculated using the size function and the following equation:

$$TA_{img} = DimH * DimW \tag{1}$$

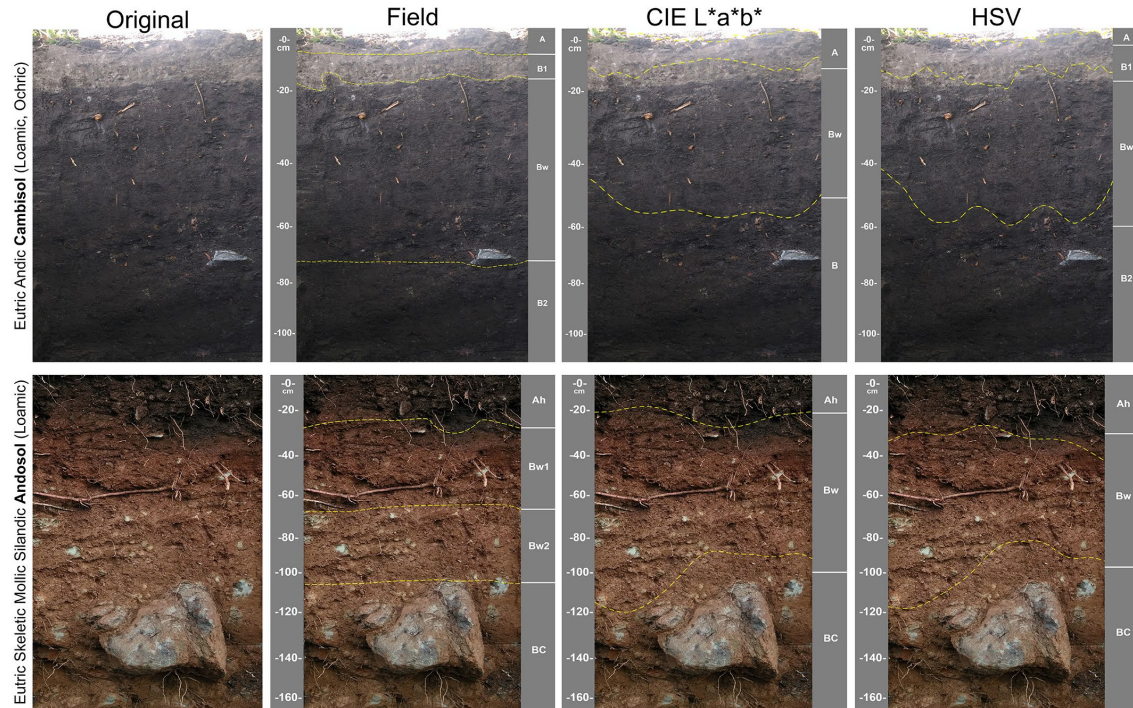


Fig. 5. Comparison of the soil horizon boundaries delineation using the CIE L*a*b* and HSV color systems with field description of the Cambisol and Andosol.

where TA_{img} refers to the total area of the pixels in the image, $DimH$ is the dimension of the image height, and $DimW$ is the image width.

The total pixel area of the objects classified as coarse fragments was calculated using the sum of the pixels within the verification of the exclusion criterion between coarse fragments and roots. The coarse fragment volume in the profile images was calculated in terms of the area

percentage of objects classified as coarse fragments using the following equation:

$$RF (Area\%) = \frac{TA_{img}}{TA_f} * 100 \quad (2)$$

Table 3
Features of the delineated soil horizons boundaries.

Soil profile		Horizon	Depth (cm)	Thickness (cm)	Horizons transition	Distinctness	Topography
CM	Field description	A	0–9	9	A-B1	Gradual	Smooth
		B1	9–15	6	B1-Bw	Gradual	Smooth
		Bw	15–72	57	Bw-B2	Diffuse	Smooth
		B2	72–113	41	–	–	–
	CIE L*a*b	A	0–11	11	A-Bw	Gradual	Smooth
		Bw	11–56	45	Bw-B	Diffuse	Wavy
		B	56–113	57	–	–	–
		B2	60–113	53	–	–	–
	HSV	A	0–4	4	A-B1	Gradual	Wavy
		B1	4–16	12	B1-Bw	Gradual	Irregular
		Bw	16–60	44	Bw-B2	Diffuse	Irregular
		B2	60–113	53	–	–	–
AN	Field description	Ah	0–29	29	Ah-Bw	Diffuse	Wavy
		Bw1	29–65	36	Bw-BwC	Diffuse	Smooth
		Bw2	65–104	39	BwC-C	Diffuse	Smooth
		BC	104–163	59	–	–	–
	CIE L*a*b	Ah	0–21	21	Ah-Bw	Diffuse	Wavy
		(Bw1 + Bw2)	21–100	79	Bw-C1	Diffuse	Wavy
		BC	100–163	63	C1-C2	Diffuse	Wavy
		BC	97–163	66	C	–	–
	HSV	Ah	0–31	31	Ah-Bw	Diffuse	Wavy
		(Bw1 + Bw2)	31–97	67	Bw-C	Diffuse	Wavy
		BC	97–163	66	C	–	–
		BC	97–163	66	C	–	–

CM = Cambisol; AN = Andosol

Table 4
Accuracy assessment of the delineated soil horizons boundaries.

Soil profile	Color model	Horizon	Thickness (cm)			AE	RE	MAE	RMSE	
			Minimum	Maximum	Mean					
CM	CIE L*a*b*	A	8	14	11	2.00	22.22	10.00	11.60	
		Bw	39	50	45	12.00	21.05			
		B	49	65	57	16.00	39.02			
	HSV	A	4	5	5	4.00	44.44	8.75	9.55	
		B1	9	15	12	6.00	100.00			
		Bw	40	48	44	13.00	22.81			
AN	CIE L*a*b*	B2	44	62	53	12.00	29.27	5.33	5.66	
		Ah	15	26	21	8.00	27.59			
		Bw	61	98	79	4.00	5.33			
	HSV	BC	47	78	63	4.00	6.78	5.67	6.24	
		Ah	24	37	31	2.00	6.90			
		Bw	50	83	67	8.00	10.67			
			BC	49	82	66	7.00	11.86		

CM = Cambisol; AN = Andosol; AE = absolute error; RE = relative error; MAE = mean absolute error; RMSE = root mean square error

where RF (Area %) is the area percentage of coarse fragments in the soil profile, TA_{img} is the total pixel area of the image, and TA_{rf} is the area of pixels in the image that correspond to objects identified as coarse fragments.

2.5. Precision assessment

The boundaries determined in the field were considered accurate to evaluate the delineation error of the Cambisol and Andosol horizons. Precise values were obtained through supervised processing to calculate the coarse fragment volume.

The calculation of the absolute error (AE) (3), relative error (RE) (4), mean absolute error (MAE) (5), and root mean square error (RMSE) (6) were calculated using the following equations:

$$AE = |V_a - V_c| \tag{3}$$

$$RE = \frac{AE}{V_a} \tag{4}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (V_{ai} - V_{ci}) \tag{5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (V_{ai} - V_{ci})^2} \tag{6}$$

where V_a is the value considered accurate, V_c is the value calculated from image processing, and n is the total number of horizons of the soil profile.

To test this method, images of 18 soil profiles were used; six images were obtained from the official database of the National Institute of Statistics and Geography (INEGI, 2013), and 12 images were from this study. Five Andosols, four Cambisols, two Regosols, and one Alisol, Kastanozem, Luvisol, Phaeozem, Solonchak, Stagnosol, and Umbrisol were used (Table 2) (Gallegos et al., 2019). The images of the 18 profiles were used to delineate the horizons; from these, 12 images with visible coarse fragments were selected for quantification.

To delineate the horizons of the test profiles, the clusters that best delimited each horizon were selected using the CIE L*a*b* and HSV color systems.

Processing was performed using supervised and unsupervised methods to quantify the percentage of coarse fragments. Because the color characteristics of each profile were very different, the appropriate VRF was identified for each profile image.

3. Results

3.1. Horizon delineation

The pre-processed Cambisol image showed three horizons (red, yellow, and green) and sunlight that hit the surface horizon (blue color). The lightness (L^*) of the CIE L*a*b* system allowed identification of the Bw and B2 horizons. The A and B1 horizons were combined. The lightness also revealed the roughness of the Bw horizon, which gradually faded into the B2 horizon. Parameter b^* integrated the A and B1 horizons into a single horizon. Parameter a^* identified the B2 horizon as described in the field; the roots are shown in lighter gray tones, as they appear in red tones in the pre-processed image (Fig. 4).

The intensity (V) with the HSV system was similar to that of the original Cambisol converted to grayscale. The hue (H) allowed the differentiation of the A horizon and highlighted the thick fragment at a depth of 72 cm, with a color tone similar to that of the A horizon. Saturation (S) allowed the approximation of the limit between the B1 and Bw horizons and revealed that the A-B1 and Bw-B2 horizons were combined. The saturation of the HSV system highlighted the thick roots of the profile, which indicated a saturation value for these components lower than that of the fine soil matrix (Fig. 4).

The pre-processed Andosol image allowed the identification of three poorly differentiated horizons. The lightness of the Andosol CIE L*a*b* system highlighted the coarse fragments of the Bw2 and BC horizons in light colors, indicating that these components have a higher lightness in the image. Component L^* also allowed the identification of the lower limit of the Ah horizon, with a lower soil profile lightness and roughness. Component b^* highlighted the Bw horizons and part of the BC horizon with light tones and the Ah horizon with darker tones.

In the pre-processed image, the Ah horizon is shown in blue tones and is represented in component b^* with darker shades of gray and reddish yellow tones with lighter grays. Component a^* did not satisfactorily differentiate the soil horizons, because the tones of the pre-processed image were primarily blue and yellow. Only the reddish-brown tones of the Bw horizon of the soil profile stood out in light gray tones (Fig. 4).

With the HSV system, the intensity (V) of the Andosol image revealed the Ah horizon in dark gray. A horizon that integrates Bw1 and Bw2 was also noted, indicating that these horizons have similar brightness. The integration of these horizons was expected, as their differentiation in the field was based not on color but on coarse fragment variation.

Hue (H) did not identify differences between horizons A, Bw, or BC. In this component, the blue tones of the pre-processed image were represented with lighter shades of gray, yellows, and reddish browns with darker tones. The saturation (S) clearly differentiated the roots and coarse fragments of the soil profile; the components with less saturation

Table 5
Soil horizon delineation test with 18 soil profiles using field data and the CIE L*a*b* and HSV color systems.

ID	Field		CIE L*a*b* (1)					HSV (2)					Better processing
	Horizon	Depth (cm)	Horizon	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Mean (cm)	Depth (cm)	Horizon	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Mean (cm)	Depth (cm)	
AL1	A	0-22	A	2.25	11.27	6.76	0-7	A	2.28	12.32	7.30	0-7	1, 2
	Bt1	22-43	Bt1	53.95	58.38	56.17	7-63	Bt1	51.44	56.79	54.11	7-61	
	Bt2	43-72	Bt2	23.35	28.39	25.87	63-89	Bt2	26.39	34.42	30.41	61-92	
AN1	Bt3	72-102	Bt3	7.99	12.82	10.40	89-102	Bt3	2.75	4.29	3.52	92-102	1, 2
	Ah	0-40	Ah	50.27	63.11	56.69	0-57	Ah	51.00	63.66	57.33	0-57	
	Bw	40-79	Bw	53.94	76.14	65.04	57-122	Bw	54.49	75.58	65.04	57-122	
AN2	C	79-142	C	11.74	28.44	20.09	122-142	C	12.84	28.80	20.82	122-142	1
	Ah1	0-34	Ah1	22.77	32.42	27.59	0-27	Ah	8.67	25.02	16.85	0-17	
	Ah2	34-44	Ah2	12.13	44.79	28.46	27-72	CBw	109.50	129.81	119.65	17-136	
	CBw1	44-67	CBw	44.05	100.71	72.38	72-145	2C	6.19	33.20	19.70	136-156	
	CBw2	67-79	2C	19.05	86.61	52.83	145-197	3C	46.57	25.27	35.92	156-192	
	C	79-86	3CA	25.49	36.13	30.81	197-218	4CA	14.37	40.88	27.62	192-218	
	2C1	86-97											
	2C2	97-120											
	2C3	120-143											
	3C	143-176											
AN3	4CA	176-218											2
	A	0-20	A	9.40	20.67	15.04	0-15	A	9.96	42.10	26.03	0-26	
	B1	20-51	B1	63.52	84.76	74.14	15-89	B1	15.04	29.32	22.18	26-48	
	B2	51-87	B2	56.76	84.95	70.85	89-162	B2	37.02	58.07	47.55	48-96	
AN4	B3	87-129						B3	27.81	54.69	41.25	96-137	1
	B4	129-162						B4	12.97	25.94	19.45	137-162	
	Ap	0-14	Ap	2.83	19.36	11.10	0-11	Ap	3.05	17.84	10.44	0-10	
	B1	14-56	B1	8.27	35.68	21.98	11-33	B1	13.27	95.30	54.29	10-65	
AN5	B2	56-106	B2	65.27	124.02	94.65	33-128	B2	27.63	99.65	63.64	65-128	2
	B3	106-169	B3	18.01	61.08	39.55	128-169	B3	24.97	59.56	42.26	128-169	
	Ah	0-12	A	69.78	92.15	80.96	0-80	A	57.73	87.17	72.45	0-72	
	Bw1	12-28	Bw	14.72	43.78	29.25	80-110	Bw	41.68	47.22	44.45	72-117	
CM1	Bw2	28-53	C	18.23	27.98	23.10	110-140	C	14.21	34.09	24.15	117-140	1
	Bw3	53-78											
	Bw4	78-104											
	C	104-140											
CM2	A	0-25	A	18.46	25.25	21.85	0-22	A	10.29	12.89	11.59	0-11	1
	Bw	25-50	Bw	33.40	57.52	45.46	22-67	Bw	7.13	13.35	10.24	11-22	
	B1	50-75	B	20.30	42.49	31.39	67-100	B1	49.65	61.18	55.41	22-77	
	B2	75-100						B2	19.03	27.51	23.27	77-100	
CM3	A1	0-15	A1	12.26	15.98	14.12	0-14	A1	23.78	28.98	26.38	0-26	1
	A2	15-30	Bw1	66.69	90.10	78.40	14-92	Bw1	63.17	79.70	71.43	26-98	
	Bw1	30-50	Bw2	17.83	37.53	27.68	92-120	Bw2	15.05	25.27	20.16	98-118	
	Bw2	50-75	Bw3	8.11	18.15	13.13	120-135	Bw3	8.30	28.73	18.52	118-135	
CM4	Bw3	75-100											1
	Bw4	100-135											
	Ah	0-18	Ah	25.22	63.53	44.38	0-44	Ah	77.41	95.98	86.70	0-87	
	Bw1	18-59	Bw	43.40	64.51	53.95	44-98	C	23.39	49.78	36.59	87-127	
KS1	Bw2	59-89	C	19.29	49.59	34.44	98-127						2
	C	89-127											
	Ah	0-18	Ah	110.79	112.96	111.88	0-112	Ah	17.85	23.86	20.86	0-21	
	B	18-66	CBm	34.37	54.56	44.47	112-152	BX	86.43	90.60	88.51	21-109	
LV1	Bx	66-107						CBm	34.04	51.56	42.80	109-152	1, 2
	CBm	107-152											
	A	0-30	A	19.29	35.51	27.40	0-27	A	22.53	36.09	29.31	0-29	
	Bk	30-60	Bk	25.20	40.10	32.65	27-60	Bk	26.35	39.72	33.03	29-62	
PH1	CK1	60-90	CK1	45.25	53.85	49.55	60-109	CK1	40.48	54.80	47.64	62-110	2
	CK2	90-125	CK2	10.63	15.21	12.92	109-125	CK2	8.53	15.59	12.06	110-125	
	Ah	0-15	Ah	8.60	20.89	14.75	0-15	Ah	102.59	134.16	118.38	0-118	
	Bt	15-46	Bt	61.80	84.98	73.39	15-88	B	14.44	47.58	31.01	118-150	
RG1	B1	46-63	B1	42.67	68.47	55.57	88-144						1
	B2	63-81	B2	10.24	18.32	14.28	144-150						
	B3	81-113											
	Bx	113-150											
RG2	A	0-45	A	56.13	64.08	60.11	0-60	A	57.48	65.44	61.46	0-61	None
	CR1	45-85	CR1	25.28	52.63	38.96	60-99	CR1	27.71	50.63	39.17	61-101	
	CR2	85-120	CR2	10.28	30.32	20.30	99-120	CR2	11.25	27.02	19.13	101-120	
SC1	Ah	0-6	AC	11.18	47.37	25.59	1-26	AC	35.44	46.62	41.03	0-41	2
	A	6-18	CA	25.63	48.50	37.07	26-63	CA	34.30	38.19	36.25	41-77	
	C	18-47	R	8.63	25.72	17.17	63-80	R	3.73	12.40	8.06	77-80	
	R	47-80											
RG2	Ah	0-35	Ah	21.69	48.76	35.23	0-35	Ah	52.27	39.20	45.73	0-46	2
	A	35-65	R	31.24	58.05	44.64	35-80	R	27.65	41.06	34.35	46-80	
	R	65-80											
SC1	A	0-24	A	5.44	14.19	9.81	0-9	A	4.83	13.44	9.13	0-9	None
	Bw1	24-45	Bw1	37.74	49.82	43.78	9-53	Bw1	24.46	40.61	32.54	9-42	
	Bw2	45-63	Bw2	27.03	36.54	31.78	53-85	Bw2	40.61	53.45	47.03	42-85	
	Bw3	63-85											

Table 5 (continued)

ID	Field		CIE L*a*b* (1)				HSV (2)					Better processing	
	Horizon	Depth (cm)	Horizon	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Mean (cm)	Depth (cm)	Horizon	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Mean (cm)		Depth (cm)
ST1	Ap1	0–27	Ap	7.52	25.01	16.27	0–16	Ap	9.86	15.74	12.80	0–13	
	Ap2	27–38	B1	41.69	73.81	57.75	16–74	B1	33.94	43.52	38.73	13–51	
	B1	38–53	Bg	9.66	36.17	22.92	74–100	Bg	44.85	49.77	47.31	51–100	
	B2	53–72											
	B3	72–82											
UM1	Bg	82–100											
	Ah	0–26	Ah	6.21	10.72	8.47	0–8	Ah	4.20	11.51	7.86	0–8	None
	B1	26–59	B1	24.70	36.81	30.75	8–39	B1	25.51	46.66	36.08	8–44	
	B2	59–94	B2	13.20	41.00	27.10	39–66	B2	14.00	42.77	28.39	44–72	
BC	94–110	B3	29.55	59.06	44.30	66–110	B3	32.39	59.14	45.77	72–110		

are shown with darker gray tones (Fig. 4). The segmentation and extraction of the Cambisol horizons with the HSV color system included the delimitation of horizons A, B1, Bw, and B2 (Fig. 5).

With the CIE L*a*b* system, the thicknesses of the Bw and B2 horizons were very similar to those delimited in the field, and the clarity and topography only coincided for the first horizon. With the HSV system, the clarity coincided in all the horizons, but the topography did not (Table 3).

The segmentation and extraction of the Andosol horizons with the CIE L*a*b* and HSV systems combined Bw1 and Bw2 into a single horizon (Fig. 5). The clarity coincided with the data from the field for both color systems, whereas the topography only coincided for the first horizon (Table 3).

The differences in topography may be due to the smoothing parameter used for feature extraction. Lower parameters tend to produce

wavy or irregular topography, whereas higher parameter values yield smoother topography.

3.1.1. Method precision

The most precise Cambisol horizon delineation was obtained by the A horizon with both color systems (Table 4). The lower MSE and RMSE values of the HSV system processing show more precise estimates. Conversely, the CIE L*a*b* color system had better precision for the Andosol. However, the Ah horizon delineated by HSV presented the lowest absolute error value. The Bw horizon was differentiated with greater precision with the CIE L*a*b* system (Table 4).

The testing method for the 18 soil profiles generally identified fewer horizons than in the field. The master horizons were mostly identified with both color systems (except the CM3 and CM4 soil profiles) because the A and B horizons of these profiles are morphologically

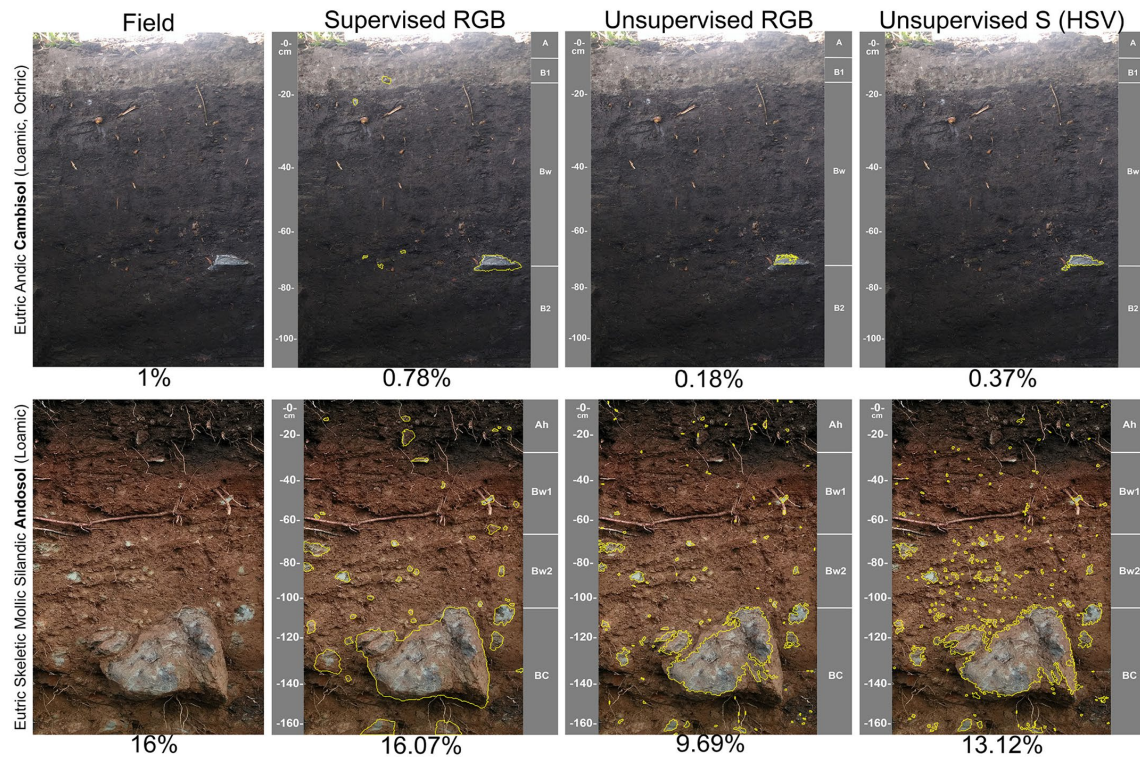


Fig. 6. Coarse fragments quantification using the RGB and the S component (HSV color system) of the Cambisol and Andosol images.

Table 6
Precision assessment of the coarse fragments quantification.

Soil profile	Estimation	Horizon	RF (Vol%)	AE	RE	MAE	RMSE
CM	Supervised with original RGB image	A	0.00				
		B1	0.63				
		Bw	1.75				
	Visual estimation in field	B2	0.00				
		A	0.00	0.00	0.00	0.16	0.22
		B1	1.00	0.37	59.52		
	Unsupervised with original RGB image	Bw	2.00	0.25	14.11		
		B2	0.00	0.00	0.00		
		A	0.00	0.00	0.00	0.42	0.61
	Unsupervised with S component (HSV color model)	B1	0.00	0.63	100.00		
		Bw	0.71	1.04	59.52		
		B2	0.00	0.00	0.00	0.42	0.61
AN	Supervised with original RGB image	Ah	1.65				
		Bw1	1.54				
		Bw2	4.10				
		BC	37.88				
	Visual estimation in field	Ah	2.00	0.35	21.21	0.96	1.19
		Bw1	2.00	0.46	29.87		
		Bw2	5.00	0.90	21.95		
		BC	40.00	2.12	5.60		
	Unsupervised with original RGB image	Ah	0.50	1.15	69.70	5.83	10.09
		Bw1	0.50	1.04	67.53		
		Bw2	3.06	1.04	25.37		
		BC	17.78	20.10	53.06		
Unsupervised with S component (HSV color model)	Ah	1.20	0.45	27.27	6.00	9.33	
	Bw1	1.14	0.40	25.97			
	Bw2	9.37	5.27	128.54			
	BC	20.00	17.88	47.20			

CM = Cambisol; AN = Andosol; RF = rock fragments; AE = absolute error; RE = relative error; MAE = mean absolute error; RMSE = root mean square error

homogeneous in terms of soil color but contain different amounts of coarse fragment. The A horizons were identified for most of the soil profiles; however, the depths were different from those delimited in the field.

In all the test profiles, fewer B and C horizons were identified than in the field, because the delineation of the horizons was conducted by considering properties other than color (Table 5).

The Andosols used in the test had very different morphologies. For AN1, AN2, and AN3, the color system that best delineated the A horizons was CIE L*a*b*. Horizons B and C were better delineated using the HSV system.

Table 7
Coarse fragments quantification test with 12 soil profiles.

ID	Field estimation (%)	Supervised RGB (1) (%)	Unsupervised RGB (2) (%)	Unsupervised S (3) (%)	Better processing
AL1	60.00	14.75	40.05	74.87	None
AN2	35.00	7.20	64.84	77.59	1, 2
AN4	0.30	0.22	0.11	8.35	1, 2
AN5	25.00	14.93	0.43	22.55	1
CM1	0.00	8.60	3.78	0.84	1
CM3	36.00	13.00	41.02	5.75	1
CM4	21.00	8.78	21.54	10.65	1
LV1	7.60	4.13	0.50	3.15	1, 2
PH1	0.00	6.87	0.43	16.95	None
RG1	74.00	46.24	13.46	33.53	1, 3
RG2	48.00	7.00	2.65	53.06	1
UM1	7.30	10.09	18.27	5.60	1

Table 8
Differences between the method proposed by Zhang and Hartemink (2019) and the Gallegos and Bautista method.

Soil properties	Process step	ZH method	GB method	
Horizon delineation	Preprocessing	Texture analysis	x	
		K-means RGB	x	
	Conversion to color models	CIE L*a*b*	x	x
		HSV	x	x
	Segmentation	CIE L*a*b*	x	x
		HSV	x	x
	Feature extraction	CIE L*a*b* + texture	x	
		HSV + texture	x	
		Using MATLAB	x	x
	Rock fragments quantification	Superpixels analysis	Using ImageJ	x
Histogram			x	
Extraction and quantification			x	

ZH method = method proposed by Zhang and Hartemink (2019); GB method = method proposed by Gallegos and Bautista in this study.

The Cambisols used to test the method also had very different morphological characteristics. The CIE L*a*b* and HSV color systems demonstrated similar performances, i.e., the B horizons presented depths significantly different from those determined in the field. The A and C horizons of the Cambisols delineated with the CIE L*a*b* system were more similar to those determined in the field (Fig. 5).

In the AL1 soil profile, the method adequately identified the dark brown surface horizon, which was not described in the field. In the KS1 soil profile, both color systems delineated various horizons similar to those determined in the field. For the RG1 soil profile, the outlined horizons did not coincide with those determined in the field, because they were differentiated based on the coarse fragment volume and not by color (Table 5).

For the ST1 and LV1 soil profiles, the CIE L*a*b* system adequately delineated the A horizon; however, the B horizons were not adequately identified, as these horizons were differentiated in the field based on bulk density and not by color changes. The horizons of the PH1, SC1, and UM1 soil profiles were not delineated satisfactorily, because their limits were not similar to those described in the field.

3.2. Coarse fragment

Superpixel analysis of the soil profile images highlighted the color differences between the components. For the Cambisol, a better result was obtained with the S component image of the HSV color system. For the Andosol, the differences between the soil components were clearer in the original soil profile image in the RGB system.

For the original soil profile image in RGB of the Cambisol, the gray levels of the histogram representing the coarse fragments and the S component were 151 and 113, respectively. The gray levels for the Andosol were 129 and 63 in the original image and with the S component, respectively. The Andosol histogram established coarse fragments and roots with the same gray level. The gray level of the coarse fragments of the Cambisol resembled that of A horizon.

The coarse fragment volume calculated without supervision of the original image and with the S component for the Cambisol was lower than the results in the field and those calculated with supervision. The unsupervised method did not detect coarse fragments in A, B1, and B2 horizons. The supervised method indicated coarse fragment values similar to those estimated visually in the field (Fig. 6).

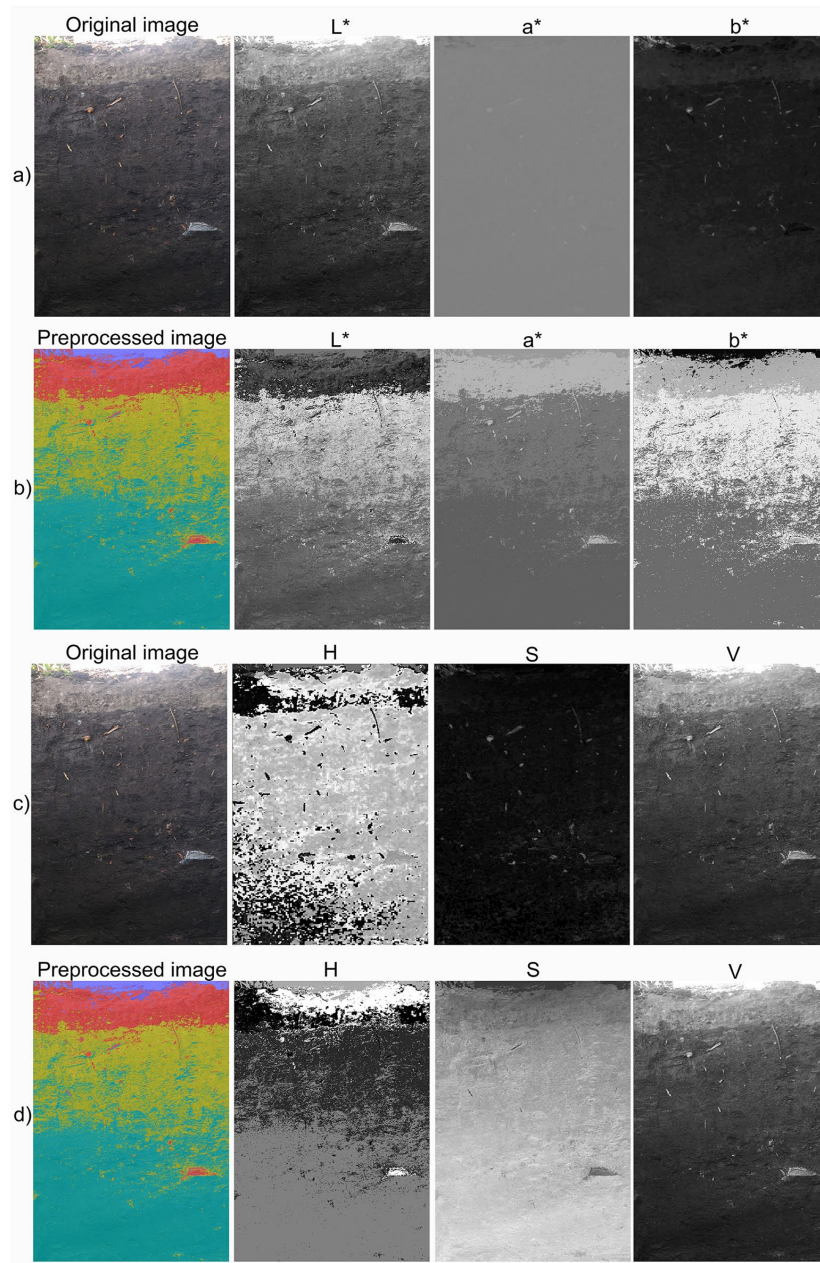


Fig. 7. Comparison of the soil color information extracted from the original image and the preprocessed image of the Cambisol.

The coarse fragment volume of the Andosol increased with depth. The unsupervised method effectively reflected this increase per horizon; however, the total coarse fragment volume from the original RGB image was underestimated (Fig. 6). The coarse fragment volume of the Bw horizon was overestimated with unsupervised S component processing (Table 6).

3.2.1. Method precision

In unsupervised processing, several coarse fragment edges were confused with the soil matrix because of attached fine earths. Consequently, the coarse fragments were overvalued and showed high MAE and RMSE values compared to those obtained in the field. This indicates that the unsupervised processing method was the poorest estimator.

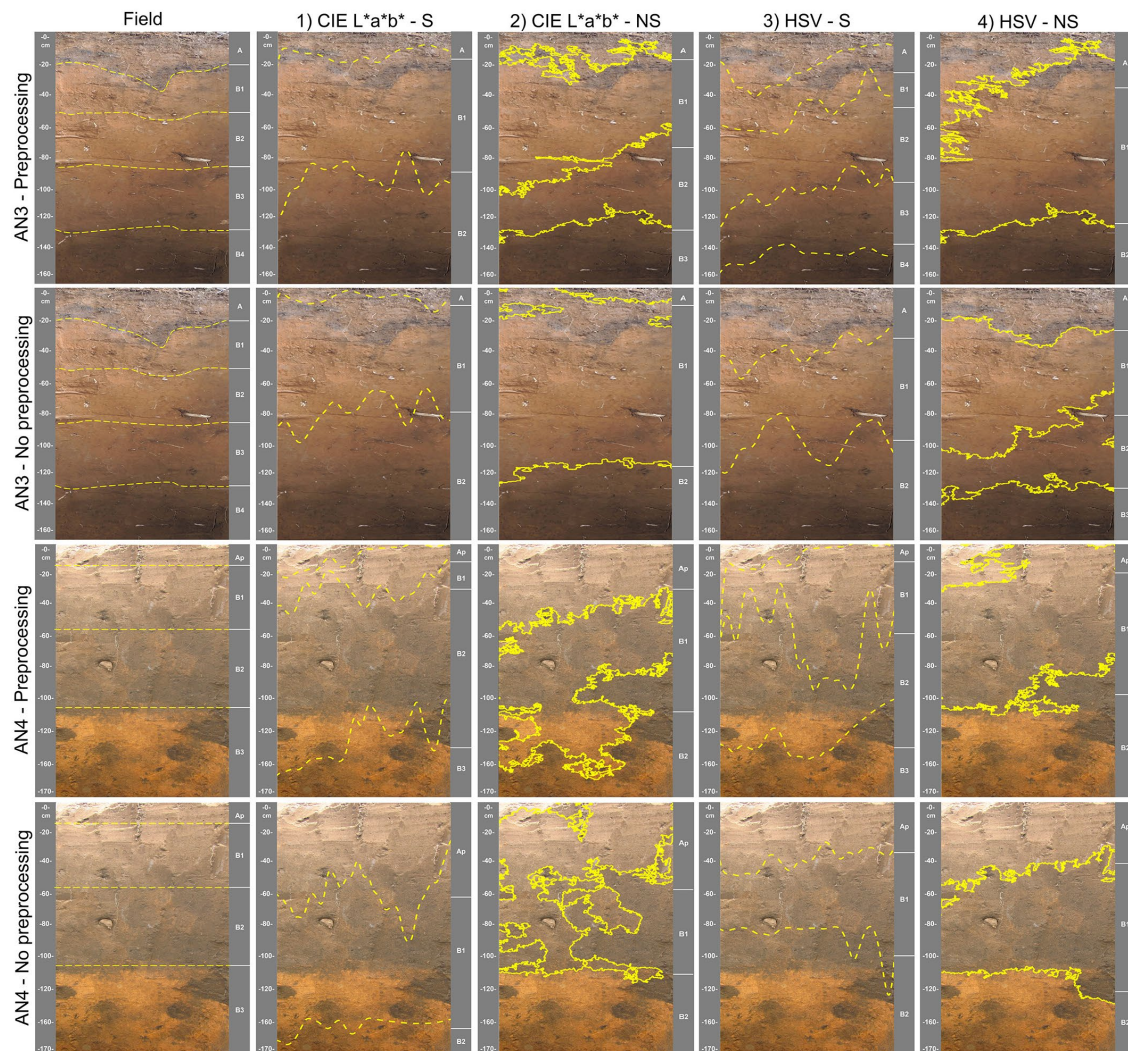


Fig. 8. Comparison of the soil horizons delineation from the original and preprocessed images of the AN3, AN4, PH1, SH, and ST1 profiles. 1) CIE L*a*b* with boundaries smoothing; 2) CIE L*a*b* without boundaries smoothing; 3) HSV with boundaries smoothing; and 4) HSV without boundaries smoothing.

The Andosol values with the highest absolute error were those calculated for the BC horizon in unsupervised processing (Table 6). Because of the scarcity of coarse fragments and the clear contrast between the fine soil matrix and the coarse fragments, the method performed better for the Cambisol with visual field estimation and unsupervised processing (Table 6).

Supervised processing generally produced the best test results. For the Andosol profiles used in the test, the supervised processing with the RGB images was the best option; however, for the AN4 profile, the unsupervised method also performed well (Table 7). The unsupervised RGB processing performed better than the S component of the HSV system for the Cambisols but similarly for the CM4 profile.

Satisfactory results for the AL1 and PH1 profiles were not obtained with any of the processing options (Table 7). For profiles with R

horizons, such as RG1 and RG2, the unsupervised RGB processing method effectively detected coarse fragments with a lower time investment than supervised processing. In the AN4, AN5, CM3, and RG2 profiles, the S component detected shiny surfaces and shadows in the profile face and the coarse fragments.

4. Discussion

The soil properties presented in this study (the delineation of horizons and coarse fragments) are fundamental to the edapho-ecological evaluation of soils—i.e., to express their properties in surface units (Bautista et al., 2016). Edapho-ecological evaluations are important and represent the first step towards interpreting the properties of the

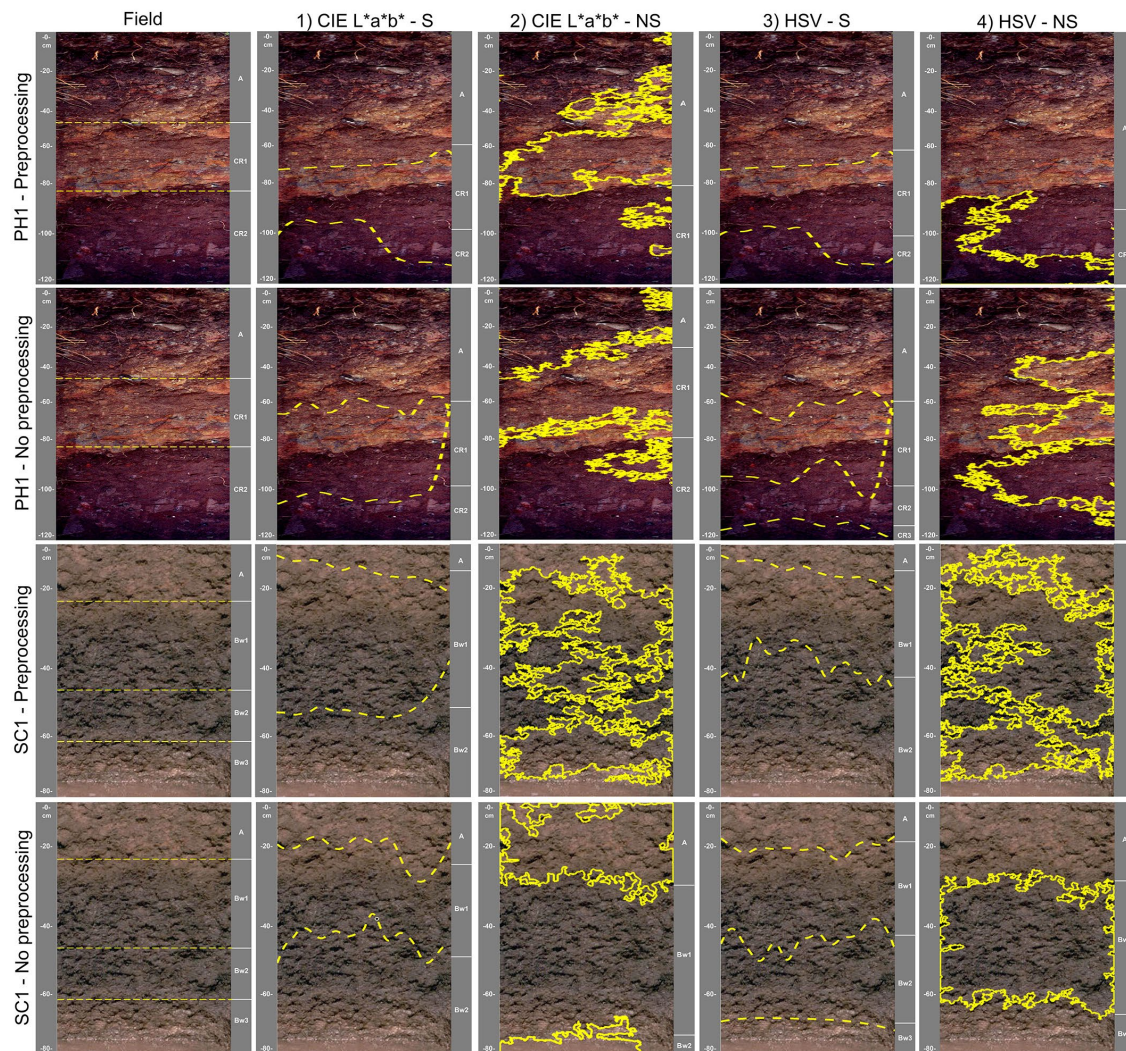


Fig. 8 (continued).

complete soil profile. This can then be used to evaluate the environmental functions (Gallegos et al., 2019).

4.1. Horizon delineation

This work was inspired by the method proposed by Zhang and Hartemink (2019). It seems fantastic to us that the delineation of the horizons can automatically be done without the bias of expert knowledge, that is why we have taken up some procedures of this ZH method. Our work is a little different since it includes new processing for the quantification of soil profile coarse fragments and other differences that we indicate in Table 8.

The results obtained for the Andosol were satisfactory because of the high contrast of horizons. However, for the Cambisol, the method did not work well because of the unclear color differences between the B horizons; therefore, k-means analysis preprocessing in the RGB original image was used.

Preprocessing the original Cambisol image produced better results. The preprocessed image was used to simulate a profile with well-marked color differences between horizons, thus improving the processing performance for both color systems, especially the CIE L*a*b* (Fig. 7). However, preprocessing did not improve the soil horizon delineation in some images of the profiles used to test the method.

For example, the color contrast of the AN4 profile was low between horizons; thus, preprocessing did not improve horizon delineation, and delineation without smoothing did not work well. Additionally, preprocessing did not work correctly for lower-quality images with roughness in the profile, as was the case for the PH1 and SC1 profiles (Fig. 8).

In this sense, in the last decade, the idea about the value of negative results in research has been retaken because this allows new research not to make mistakes that have already been identified by others. For example, Mehta (2019) affirms "when negative results aren't published in high-impact journals, other scientists can't learn from them and end up

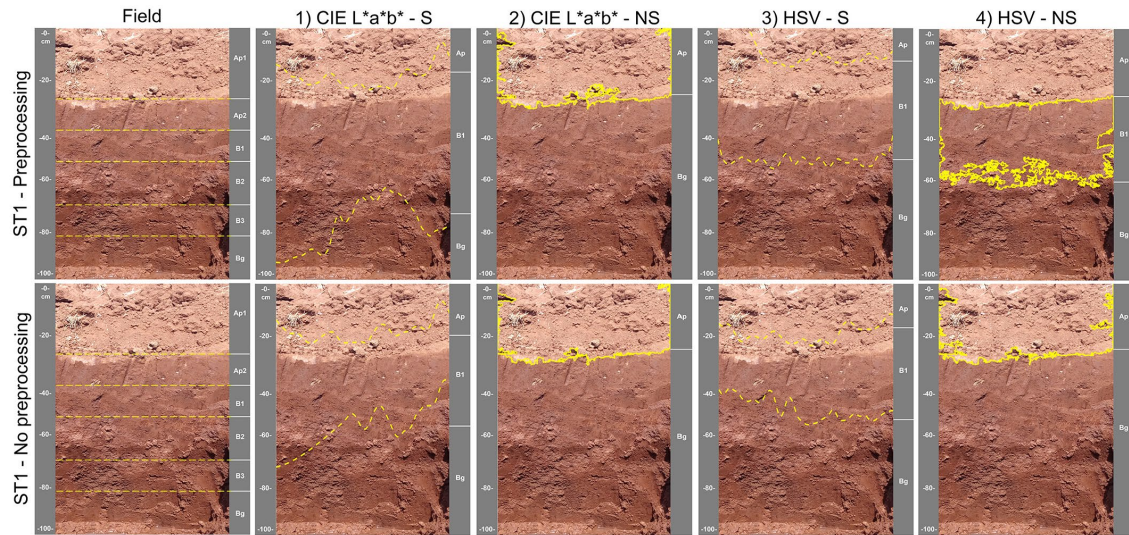


Fig. 8 (continued).

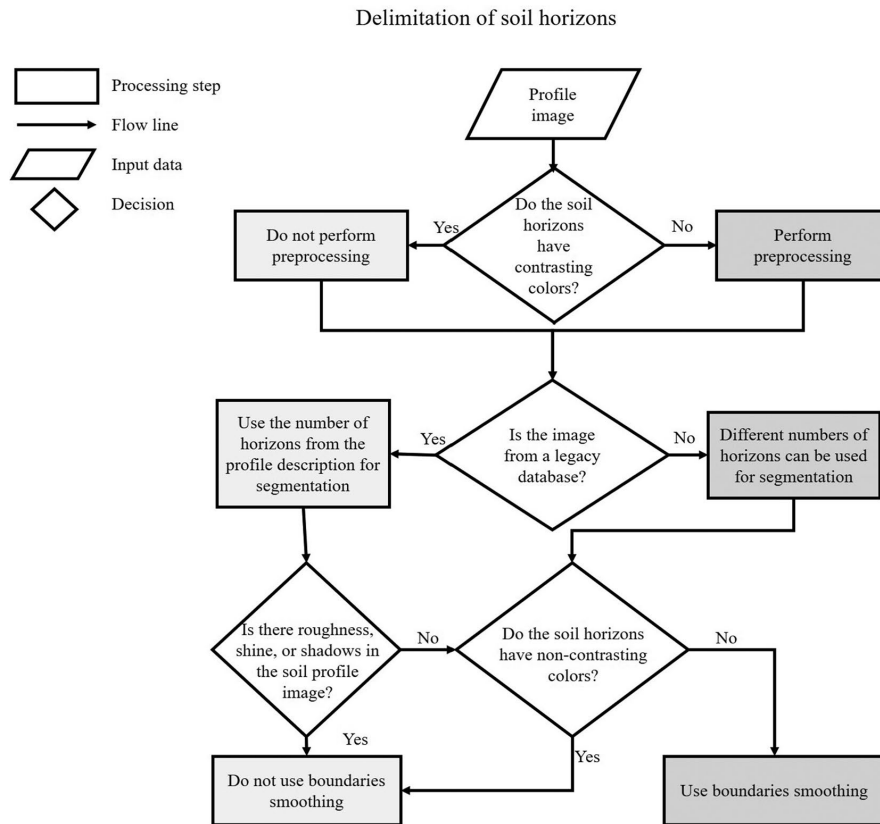


Fig. 9. Graphic system for decision-making for the delimitation of soil horizons using digital images of soil profiles.

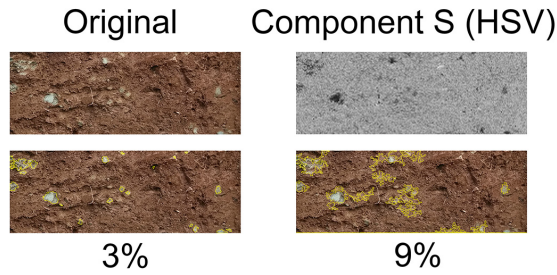


Fig. 10. Coarse fragments overestimation of the HSV color system S component, for the Bw2 horizon of the Andosol.

repeating failed experiments, leading to a waste of public funds and a delay in genuine progress”.

Based on the results obtained in this study, the differentiation of horizons with black and gray colors is more effective from the b coordinate of the CIE L*a*b* system; additionally, highlighting the roots and thick fragments, saturation using the HSV system is effective.

The color systems used in image processing (CIE L*a*b and HSV) represent a greater number of colors than the human eye can capture. For greater precision and less subjectivity in soil horizon delimitation, the user can indicate the number of horizons perceived in the images.

Image processing of soil profiles can identify new, unidentified horizons in the field.

The overlapping boundaries without smoothing were irregular but conformed to the natural color variation at the edges of the soil horizons. The boundaries precisely delineated the breaks between the horizons and the differentiated specks. Therefore, in some cases, the lines should be smoothed using dotted and thin lines instead of the smoothing spline function. For example, in the ST1 and AN3 profiles, the horizon limits did not coincide because of boundary smoothing. The horizon limits of these profiles were better delineated without smoothing (Fig. 8).

However, for horizon thicknesses that do not coincide with those in the field, horizon thickening should be calculated as an average value for the transitional zone, as proposed by FAO (2009).

To delimit the horizons, we recommend determining if their colors are contrasting, and if the image contains rough, shiny, or shadowed areas. Additionally, the source of the image should be considered, as the application of the method is different if captured specifically for processing or collected from legacy data sources. We created a graphic system for decision-making for the delimitation of soil horizons using digital images (Fig. 9).

The methods created for the delineation of horizons are a breakthrough, however, not recommended to use images from legacy databases because there are often poor quality images, which can lead to interpretation errors.

Quantification of soil coarse fragments

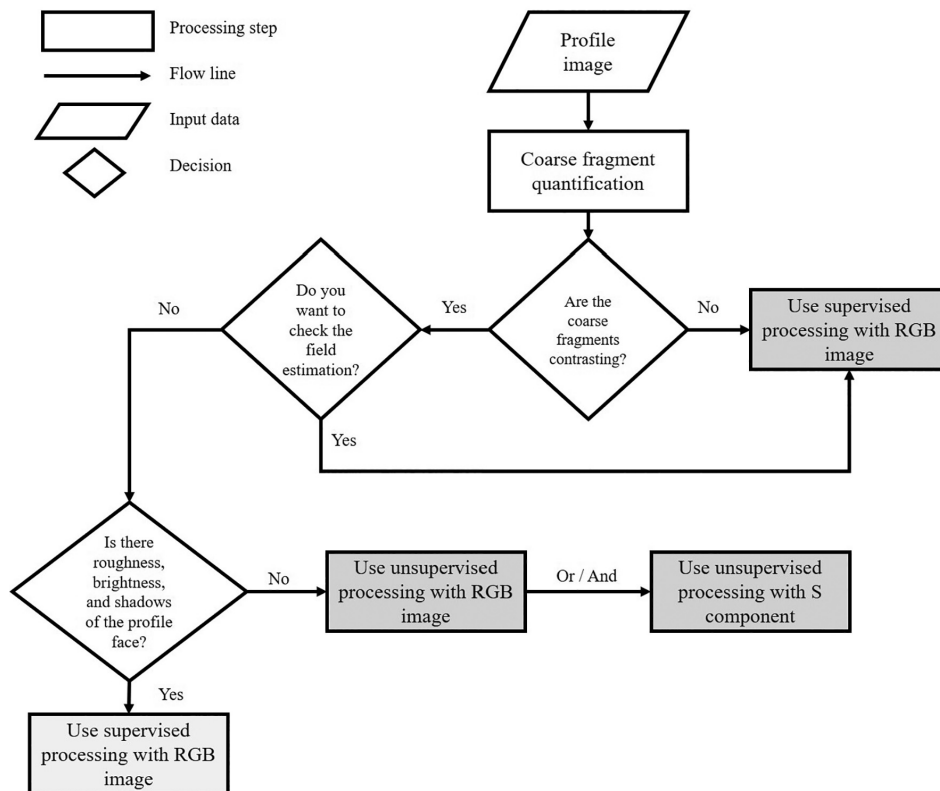


Fig. 11. Graphic system for decision-making for the quantification of coarse fragments using digital images of soil profiles.

4.2. Coarse fragment

The use of color in the soil profile images for the quantification of coarse fragments can be a complex or simple process depending on the color contrast between the soil matrix and coarse fragments. Regardless, image processing should always be supervised and include prior image pre-processing to delimit the coarse fragments and/or to perform a detailed review of the congruence of the results—including manual correction, if necessary.

The saturation component (S) highlighted the coarse fragments and the roughness, brightness, and shadows in some soil profiles (Fig. 10); this was also reported by Jiang et al. (2020). In this study, processing was performed on an image with coarse fragments of low color contrast and attached fine earth particles. Detected objects that did not correspond to the coarse fragments were manually corrected.

We advise using a brush and, if necessary, a razor to rigorously clean the profile face and the roots and to remove the fine earth stuck to the coarse fragments. We created a graphic system for decision-making for the identification and quantification of coarse fragments in digital images of soil profiles (Fig. 11).

However, achieving soil security objectives (McBratney et al., 2014; Gallegos et al., 2019) requires recovering and modernizing information from legacy soil databases. Additionally, new proximal soil sensors (e.g., mobile equipment, such as XRF, pH, electrical conductivity, and magnetic susceptibility detectors, gamma-ray spectrometer, water content reflectometer, and cone penetrometer) should be proposed to generate more accurate soil information for decision-makers (Hartemink and Minasny, 2014; Hartemink, 2015; Gallegos et al., 2016; Zhang et al., 2019; Vasques et al., 2020).

Thus, more photographs of soil profiles should be studied that include low, medium, and high color contrasts between soil horizons. Profiles with and without smoothing, coarse fragments, and concretions, should be included. Additionally, other soil reference groups, such as the non-percolating Calcisols, Gypsisols, Solonchaks, and Solonetz, should be studied.

5. Conclusions

The study area contains soil profiles with high and low contrast colors in their horizons and thick fragments, even in soils of the same reference group. Therefore, we recommend adapting the application of the digital photograph analysis method to the particularities of the soil profile.

For soils with high color contrast, adequate horizon delineation can be obtained without digital image preprocessing. We do not recommend applying the horizon smoothing process when images are textured, bright, or poorly lit.

Additionally, we recommend supervised application for soils with low color contrast between coarse fragments and fine earth or between horizons.

We recommend supervised application to verify the accuracy of the visual field estimates of the percentage of coarse fragments, especially for low color contrasts between coarse fragments and the fine earth matrix. Conversely, we recommend unsupervised application for the quantification of coarse fragments when the images do not have bright, dark, or textured areas.

The results of this work allow a better selection of methods for processing digital images of soil profiles and for transitioning from visual estimates by experts to digital quantification of soil properties (21st-century soil science).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.


Acknowledgment

This research was funded by DGAPA Universidad Nacional Autónoma de México (grant number IN209218) and SEP-CONACYT 283135.

References


- Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., Susstrunk, S., 2012. Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 34 (11), 2274–2282. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.120>.
- Adobe, 2012. Adobe photoshop. <https://www.adobe.com/mx/>. (Accessed 23 July 2020).
- Ali Aldabaa, A.A., Weindorf, D.C., Chakraborty, S., Sharma, A., Li, B., 2015. Combination of proximal and remote sensing methods for rapid soil salinity quantification. *Geoderma* 239–240, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.011>.
- Bautista, F., Gallegos, A., Pacheco, A., 2016. *Analysis of the Environmental Functions of Soil Profile Data (Soil & Environment)*, second ed. Skiu, Mexico, Ciudad de México.
- Bedolla-Ochoa, C., Bautista, F., Gallegos, A., 2018. Environmental functions of smallholder farmer land classes in the Zicuirán-Infiernillo biosphere reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 24 (3), 265–274. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.09.058>.
- Bedolla-Ochoa, C., Bautista, F., Ihl, T., Dubrovina, I., 2019. Diversidad de suelos y su distribución espacial. En: *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2*. vol. 1. CONABIO, México, pp. 51–59.
- CIE, 1977. Recommendations on uniform color spaces, color-difference equations, and metric color terms. *Color Research & Application* 2 (1), 5–6. <https://doi.org/10.1002/j.1520-6378.1977.tb00102.x>.
- Day, R.P., 1965. Pipette method of particle size analysis. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp. 553–562.
- De la Torre, E.Y., 2003. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones Geográficas* 50, 220–234. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56905018>.
- Duda, B.M., Weindorf, D.C., Chakraborty, S., Li, B., Man, T., Paulette, L., Deb, S., 2017. Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. *Geoderma* 298, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.017>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2009. *Guía para la descripción de suelos, cuarta ed.* FAO, Roma.
- Gallegos, A., Bautista, F., Dubrovina, I., 2016. Software to evaluate the environmental functions of soils. *Softw. Syst. 2*, 195–200. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.114.195-200>.
- Gallegos, A., López-Carmona, D., Bautista, F., 2019. Quantitative assessment of environmental soil functions in volcanic zones from Mexico using S&E Software. *Sustainability*, 11 (17), 4552. <https://doi.org/10.3390/su11174552>.
- Gholizadeh, A., Saberioon, M., Viscarra, R.A., Boruvka, L., Klement, A., 2020. Spectroscopic measurements and imaging of soil colour for field scale estimation of soil organic carbon. *Geoderma* 357, 113972. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113972>.
- González, A.M., 2018. Image J: una herramienta indispensable para medir el mundo biológico. *Folium Relatos botánicos* 1, 6–17. <https://botanicargentina.org.ar/wp-content/uploads/2018/09/AR-Folium-Issu.pdf>.
- González, R.C., Woods, R.E., 2008. *Digital Image Processing*, third ed. Pearson Prentice Hall, United States of America.
- Hartemink, A.E., 2015. New tools for Pedologists: digital soil Morphometrics. *Soil Horizons* 56 (2), 1–2. <https://doi.org/10.2136/sh2015-56-2-gc>.
- Hartemink, A.E., Minasny, B., 2014. Towards digital soil morphometrics. *Geoderma* 230–231, 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>.
- Herrick, J.E., Van Zee, J.W., McCord, S.E., Courtright, E.M., Karl, J.W., Burkett, L.M., 2016. *Monitoring Manual for Grassland, Shrubland, and Savanna Ecosystems, Volume 1: Core Methods*, second edition. US Department of Agriculture Agricultural Research Service Jornada Experimental Range, Las Cruces, NM, USA.
- Ihl, 2019. *Localización geográfica y regionalización. La biodiversidad en Michoacán. Estudio del Estado 2*. vol. 1. CONABIO, México, pp. 21–29.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2007. Capítulo II. Caracterización ambiental de México y su correlación con la clasificación y la nomenclatura de las comunidades vegetales. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/421/cap2.html>. (Accessed 10 November 2020).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013. Conjunto de datos de perfiles de suelos escala 1:250,000 serie II continuo nacional. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>. (Accessed 29 September 2020).
- IUSS Working Group WRB, 2015. *World reference base for soil resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. 2015th ed.; World Soil Resources Reports No. 106; World Soil Resources, Rome, Italy.
- Jiang, Z., Wang, Q., Adhikari, K., Brye, K.R., Sun, Z., Sun, F., Owens, P.R., 2020. A vertical profile imaging method for quantifying rock fragments in gravelly soil. *Catena* 193, 104590. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104590>.
- Más-Martínez, R., Fernández-Denis, I., Villegas, R., Bautista, F., 2011. *Monolitos de suelos*. In: Bautista, F. (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 227–258.
- McBratney, A., Field, D.J., Koch, A., 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 213, 203–213.
- Mehta, D., 2019. Highlight negative results to improve science. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02960-3>. (Accessed 4 May 2021).
- Mythik, K., Kavitha, V., 2012. Color image segmentation using ERKFCM. *International Journal of Computer Applications* 41 (20), 21–28.
- Nanzoy, M., 2002. Unique properties of volcanic ash soils. *Glob Environ Res* 6 (2), 99–112.

- Nelson, D., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Wisconsin, EUA, pp. 539–577.
- O'Donnell, T.K., Goynes, K.W., Miles, R.J., Balfaut, C., Anderson, S.H., Sudduth, K.A., 2010. Identification and quantification of soil redoximorphic features by digital image processing. *Geoderma* 157 (3–4), 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.019>.
- Ortiz, O., Porta, J., Arbelo, C.D., 2014. Criteria and recommendations for capturing and presenting soil profile images in order to create a database of soil images. *Spanish Journal of Soil Science* 4 (1), 112–126. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2014.V4.N1.08>.
- Plataniotis, K.N., Venetsanopoulos, A.N., 2000. *Color Image Processing and Applications*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Rakib, Md., Rahman, R., Islam, T., 2017. Color image segmentation using automated K-means clustering with RGB and HSV color spaces. *Global J Comp Sci Technol* 17 (2). <https://computerresearch.org/index.php/computer/article/view/1587>.
- Reiter, C., 2004. With j: image processing 2: color spaces. *SIGAPL APL Quote Quad* 34 (3), 3–12. <https://doi.org/10.1145/1127556.1127557>.
- Rhoades, J., 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part vol. 2. Agronomy Monograph*. EUA, Wisconsin, pp. 178–190.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils*, third ed. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002. *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación, México.
- Siebe, C., Janh, R., Stahr, K., 2006. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, cuarta ed. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México.
- The MathWorks, Inc., 2020. Trazar clasificación de tierras con características de color y superpíxeles. <https://la.mathworks.com/help/images/land-classification-with-color-features-and-superpixels.html>. (Accessed 29 September 2020).
- Vasques, G.M., Rodrigues, H.M., Goelho, M.R., Baca, J.F.M., Dart, R.O., Oliveira, R.P., Teixeira, W.G., Ceddia, M.B., 2020. Field proximal soil sensor fusion for improving high-resolution soil property maps. *Soil Syst.* 4, 52. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4030052>.
- Zhang, Y., Hartemink, A.E., 2019. A method for automated soil horizon delineation using digital images. *Geoderma* 343, 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.002>.
- Zhang, Y., Hartemink, A.E., Huang, J., 2019. Quantifying rock fragments in soil samples using a digital camera. *Eurasian Soil Sci* 52, 954–962. <https://doi.org/10.1134/S1064229319080179>.





Capítulo III. Quantitative assessment of
environmental soil functions in volcanic zones
from Mexico using S&E software

Artículo publicado en Sustainability
<https://doi.org/10.3390/su11174552>



Article

Quantitative Assessment of Environmental Soil Functions in Volcanic Zones from Mexico Using S&E Software

Ángeles Gallegos *, Dante López-Carmona and Francisco Bautista *

Center for Research in Environmental Geography, National Autonomous University of Mexico, Morelia, Michoacán 58190, Mexico

* Correspondence: atavera@pmip.unam.mx (Á.G.); leptosol@ciga.unam.mx (F.B.);
Tel.: +52-443-473-7703 (Á.G.); +52-443-322-3869 (F.B.)

Received: 29 May 2019; Accepted: 18 August 2019; Published: 22 August 2019



Abstract: Making quantitative evaluations of the environmental functions of the soil in a quantitative way is an urgent necessity for transitioning towards the sustainable use of soils. The objective of this work was to use and improve the Soil and Environment software for soils of volcanic areas, for which the software was not designed to work on. The study was conducted in the volcanic area of Michoacan, Mexico. Nine soil profiles were described; samples were taken from each horizon and the physical and chemical properties of each sample were analyzed. The Soil and Environment software was used to conduct pedoecological evaluations of the soil samples and, subsequently, an evaluation of the environmental functions of the soils and the modeling of scenarios was carried out. The soil profiles studied showed variable properties of hydraulic conductivity, field capacity, air capacity, effective cation exchange capacity, and soil organic carbon. The soils showed very high nutrient retention, high naturalness and sorption of heavy metals, and low cultural and natural archive properties. The Soil and Environment software generally works well with soils of volcanic areas; however, we suggest improvements in the evaluation method of the following functions: naturalness and agricultural quality. Additionally, the estimating method of aeration capacity and hydraulic conductivity should be calibrated for the properties of the volcanic soils. The modeling of scenarios allowed us to identify the soil profiles that are most vulnerable to degradation. The modeling of scenarios provided a clear idea of the negative and positive effects that a change in soil use would have.

Keywords: soils; software; ecological services; soil degradation models; soil conservation models

1. Introduction

Some estimations suggest that about 12 million hectares of soil are lost and degraded per year in the world [1]. The accelerated growth of the world population has increased the demand for food and materials obtained from the soil [2]. This phenomenon has exerted ever greater pressure on edaphic resources and, as a consequence, has accelerated degradation of the soil, putting at risk the capacity of the soils to provide enough to guarantee food security [3].

Traditionally, the agricultural capacity of soils has been evaluated using quantitative methods [4–6], but only isolated properties, such as slope, depth, etc., have been taken into account. These evaluations never consider the properties of the complete soil profile.

In the center of Mexico, the physiographic province called the “transversal Neovolcanic axis” is located, which has more than two thousand volcanoes, with heights of up to 5610 m above sea level in the Pico de Orizaba volcano. In this physiographic province, several lakes and aquifers are located,

as well as the two main rivers of the country, the Lerma River and the Balsas River, and the most fertile soils of the country (Andosols, Cambisols, Luvisols, Acrisols, and Vertisols). The sustainable management of these soils of volcanic origin is of immense importance for Mexico [7].

On the other hand, the value of the environmental functions of soils has been recognized in recent years [8–11], but only qualitative models have been developed for evaluating these functions [12–14]. There are a few examples of quantitative models that consider the environmental soil functions, but the complete soil profile has never been included in these evaluations [15–19]. The first quantitative models for evaluating the environmental soil functions considering the complete soil profile were made by [8,20]. These models were later modified and improved for the development of algorithms [15] and a commercial multiplatform and multilingual software called Soil & Environment [16,17].

The Soil & Environment software has been evaluated and used successfully [8,18,21]; however, it is still necessary to calibrate it to work with the specific conditions of all possible soils, such as Andosols.

The objective of this work was to conduct a quantitative evaluation of the environmental soil functions in volcanic zones to improve the functionality of Soil & Environment software algorithms, as well as the development of change models by the degradation or conservation of soil profiles.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area and Sampling

All the described soils were found in the physiographic province of the Neovolcanic axis in the municipalities of Cheran, Zacapu, and Quiroga, in the state of Michoacán (Figure 1). The predominant vegetation in the studied sites is classified as dominated or mixed temperate forests with *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus*, and secondary vegetation [22]. The main economic activity is forestry and the production of rainfed corn [23]. The climate is temperate, with rains in the summer (Cw); the average annual temperature is $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$, with an average annual precipitation of $800 \pm 150\text{ mm}$ [24]. The main soils are Luvisols, Andosols, Phaeozems, Cambisols, Leptosols, Vertisols, and Durisols from extrusive igneous rocks, mainly basalt, dacite, and basic volcanic breccia [25].

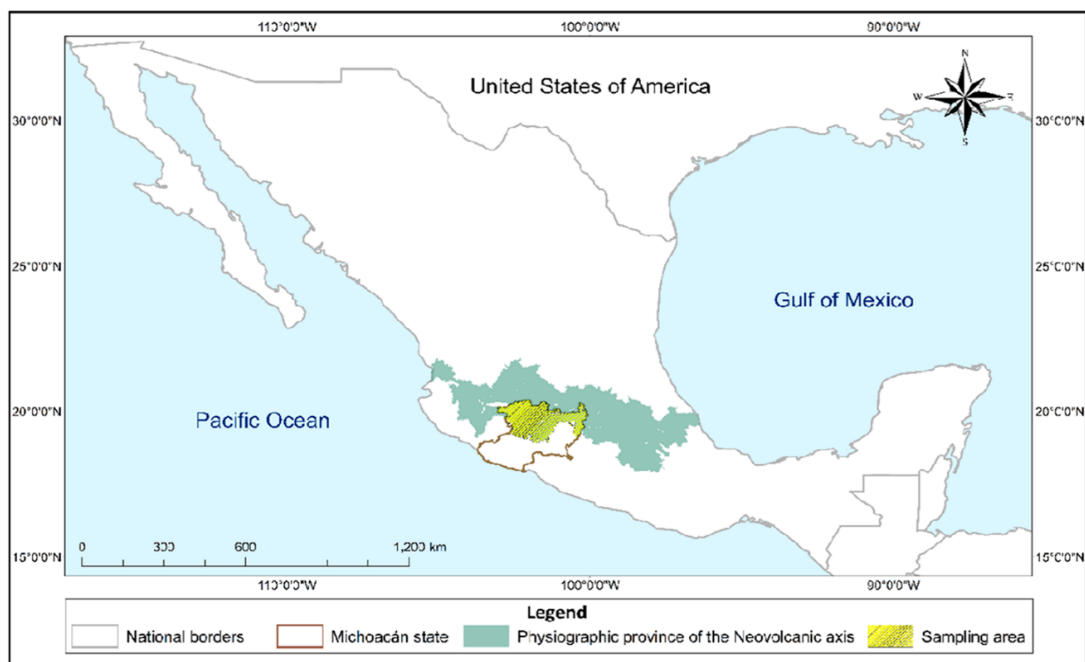


Figure 1. Sampling area location.

The sites were selected based on their geomorphological attributes: plains, hills, mountains, high hills, and low hills. A total of forty-four horizons from nine soil profiles were described by making pits at least 1.2 m deep or until reaching the parent material (Table 1).

Table 1. Geographical location of the soil profiles and their management.

No.	Key	Geoform	Coordinates			Soil Use
			X	Y	Zone	
1	Cherán 001	Plain	191137.77	2176993.00	13 N	Rainfed corn
2	Cherán 002	Hill	807927.56	2184911.75	13 N	Quercus Forest
3	Cherán 003	Mountain	810550.44	2185337.75	13 N	Pinus-Quercus forest
4	Cherán 004	Plain	810525.12	2185213.75	13 N	Rainfed corn (3 years without cultivation)
5	Zacapu 001	Hill	211840.64	2187352.75	14 N	Abandoned grassland
6	Zacapu 002	High hills	207175.25	2186290.75	14 N	Quercus Forest
7	Zacapu 003	Low hills	213589.80	2185233.70	14 N	Secondary Vegetation/Huizachal
8	Quiroga 001	High hills	228113.43	2179897.25	14 N	Pinus forest
9	Quiroga 002	Hill	237127.81	2174538.75	14 N	Pinus-Quercus forest

2.2. Description of Soils and Methods

The soils were classified based on the standards of the World Reference Base [26]. The geographical and geomorphological characteristics, as well as the dominant vegetation and its management, were described for each site. In addition, the soil structure, pedological traits, wet color, and bulk density of each soil were analyzed [6,7,27].

A soil sample was collected from each horizon in order to identify diagnostic horizons, properties, and materials of the soil profiles, and to model the soil functions [5,6,16]. The physical and chemical properties of the soil samples were analyzed. The pH and electrical conductivity were measured using a potentiometer and conductivity meter, respectively (1:2 H₂O) [6]. The content of organic matter and organic carbon was analyzed by the wet digestion method [28]. The cation exchange capacity and exchangeable bases (Ca, Mg, Na, and K) were determined using ammonium acetate (pH 7.0) [29]. The percentage of particles (sand, silt, and clay) was determined by the American pipette method [30], and the textural class of the soil horizon was verified using the soil texture triangle [31].

2.3. Evaluation of Environmental Soil Functions

The environmental soil functions were determined with the Soil and Environment software [16], which is a private software registered by the Mexican company Acts with Science [32]. This tool allows the environmental functions of soils to be evaluated based on the integration of quantitative and qualitative attributes of the soil profile and environmental elements such as vegetation, soil management, soil history, and the physical and chemical properties evaluated in the field and laboratory.

The evaluations carried out by Soil and Environment are based on algorithms of the Technique for Soil Evaluation and Categorization (TUSEC) [20]. The software provides an evaluation, on a scale of 1–5, where five represents a very high soil aptitude to perform the environmental function, four refers a high aptitude, three is an intermediate aptitude, two represents a low aptitude, and one is a very low aptitude [16]. The soil function scenarios that can be modeled are: (1) human habitats, in which sites suitable for human settlements are identified; (2) decomposition of organic compounds, which allows the capacity of microorganisms to maintain the cycling of nutrients to be evaluated; (3) the natural archive, which allows the history of soils to be evaluated through pedological or geological features in the subsoil; (4) the cultural archive, which considers elements related to ancient populations such as artifacts; (5) naturalness of the soil, which evaluates the importance of the soil as a reservoir of diversity of animals and plants; (6) aquifer recharge, which evaluates the importance of soils for the water purification and recharge of aquifers; (7) retention of nutrients, which analyses soil fertility in order to plan soil management practices; (8) agricultural quality, which evaluates the capacity of soils

for food production; (9) soil organic carbon content, which estimates the soil organic carbon content by horizon and profile; and (10) absorption and adsorption of heavy metals, which evaluates the capacity of soils to adsorb contaminants such as heavy metals [16,17].

The Soil and Environment software evaluates the environmental soil functions through the analysis of quantitative and semi-quantitative parameters determined in the laboratory and field, respectively [17]. For example, heavy metal sorption is estimated using the following equations [8]:

- (1) Estimation of the fine earth volume:

$$FE_i \text{ (kg m}^{-2}\text{)} = BD_i \text{ (g cm}^{-3}\text{)} * TH_i \text{ (dm)} * (1 - (CR_i \text{ [Vol. \%]}/100))$$

where FE_i (kg m^{-2}) refers to the soil particles smaller than 2 mm of soil horizon i in kg m^{-2} ; BD_i (g cm^{-3}) is the bulk density of soil horizon i in g cm^{-3} ; TH_i (dm) is the thickness of horizon i in decimeters; and CR_i (Vol. %) is the volume of stones in soil horizon i .

- (2) The amount of clay is calculated as

$$AR_i \text{ (kg m}^{-2}\text{)} = FE_i \text{ (kg m}^{-2}\text{)} * (PA_h \text{ [\%]}/100)$$

where AR_i (kg m^{-2}) is the content of clay at depth i in kg m^{-2} ; FE_i (kg m^{-2}) refers to the soil particles smaller than 2 mm at depth i in kg m^{-2} ; and PA_h (%) is the percentage of clay at depth i .

- (3) The content of organic carbon is calculated as

$$COS_i \text{ (kg m}^{-2}\text{)} = FE_i \text{ (kg m}^{-2}\text{)} * (C_i \text{ [\%]}/100)$$

where COS_i (kg m^{-2}) is the content of organic carbon at depth i in kg m^{-2} ; FE_i (kg m^{-2}) refers to the soil particles smaller than 2 mm at depth i in kg m^{-2} ; and C_i (%) is the carbon percentage at depth i .

- (4) To estimate the sorption index, the values of pHF_i , ARF_i , and $COSF_i$ are converted into factor values (Table 2) and applied to the following equation:

$$IABC_i = (pHF_i + ARF_i + COSF_i)/3$$

where $IABC_i$ is the adsorption index; pHF_i is the pH factor; ARF_i is the clay factor; and $COSF_i$ is the carbon factor.

Table 2. Value of the pH, clay, and organic carbon factors for an estimation of the sorption index [7].

pH	Factor	Clays (kg m^{-2})	Factor	Organic Carbon (kg m^{-2})	
>7	5	>3	5	>0.8	5
6.5–7	4	2.5–3	4	0.6–0.8	4
6–6.5	3	2–2.5	3	0.4–0.6	3
5.5–6	2	1.5–2	2	0.2–0.4	2
≤5.5	1	<2	1	<0.2	1

Other models for evaluating the environmental soil functions are described in detail in the Soil & Environment software manual [16].

2.4. Degradation and Conservation Models

The environmental functions of the nine soil profiles were evaluated (Table 3), and three scenarios were modeled: (a) a degradation scenario for each soil profile considering the loss of horizon A by simulating an agricultural use; (b) a degradation scenario for each soil profile simulating the loss of horizon A and half of horizon B as a result of livestock use; and (c) a conservation scenario for each soil profile in which the thickness of horizon A increases up to 40 cm to represent a forest use [33].

Table 3. Basic chemical and physical properties of soils.

Profile Key	Horizon	Depth cm	pH H ₂ O	Exchangeable Bases				CEC	OM	BD	Sand	Silt	Clay	Texture
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺							
Cherán-001	Bw1	0–27	6.07	1.70	13.76	0.43	0.82	10.18	3.25	1.30	49.90	31.80	18.30	L
	Bw2	27–38	6.32	1.66	14.67	0.45	0.51	31.49	2.21	1.17	49.90	31.00	19.00	L
	Bw3	38–97	6.73	1.66	17.81	0.43	0.40	18.82	2.73	1.06	47.20	34.30	18.50	L
	Bw4	97–135	6.95	1.69	17.54	0.51	0.47	19.01	1.82	1.00	52.70	33.40	13.90	SL
	Bw5	135–193	6.95	1.71	19.26	0.56	0.59	12.10	2.60	1.05	63.50	24.90	11.70	SL
Cherán-002	Ah	0–40	6.05	1.68	18.11	0.36	0.67	27.26	9.61	0.73	33.90	53.80	12.30	SiL
	Bw	40–79	6.84	1.40	13.90	0.34	0.91	29.95	4.55	0.83	29.40	57.90	12.70	SiL
	C	79–142	6.85	1.55	18.19	0.43	0.39	34.37	3.51	0.91	26.00	56.60	17.40	SiL
Cherán-003	Ah	0–17	6.40	1.61	27.28	0.49	2.15	29.38	5.46	0.92	40.40	41.80	17.80	L
	Bw1	17–56	7.17	1.59	29.68	0.75	2.40	45.12	1.30	0.84	25.30	48.90	25.80	L
	2BC	56–74	7.16	1.49	27.12	1.29	0.40	36.29	1.69	1.11	53.80	37.60	8.70	SL
	2C	74–89	7.05	1.57	30.75	0.94	0.46	19.39	1.43	1.06	79.30	13.00	7.80	LS
	3B2	89–116	7.15	1.68	25.57	0.62	0.48	32.45	1.43	1.26	92.10	2.50	5.40	S
	3BC2	116–136	7.34	1.54	30.40	0.75	0.75	27.46	0.78	1.28	82.70	15.70	1.60	LS
Cherán-004	4C2	136–151	6.95	1.54	30.00	0.73	1.09	17.28	0.82	1.60	90.30	2.40	7.30	S
	Ah	0–39	6.28	1.66	16.38	0.39	0.23	28.80	4.16	1.09	32.40	55.10	12.50	SiL
	Bw1	39–60	6.91	1.68	19.68	0.54	0.23	18.62	2.73	1.04	32.40	51.20	16.40	SiL
	Bw2	60–131	6.84	1.61	25.04	0.79	0.10	25.92	2.86	0.93	15.90	61.30	22.80	SiL
Zacapu-001	Bw3	131–194	7.45	1.58	25.87	1.18	0.08	33.79	1.82	0.94	15.50	57.80	26.70	SiL
	Ah	0–18	5.92	1.66	16.38	0.39	0.23	28.80	4.16	1.27	32.40	55.10	12.50	SiL
	Bw1	18–59	5.91	1.68	19.68	0.54	0.23	18.62	2.73	1.39	32.40	51.20	16.40	SiL
	Bw2	59–89	6.21	1.61	25.04	0.79	0.10	25.92	2.86	1.24	15.90	61.30	22.80	SiL
	Bm	89–127	–	1.58	25.87	1.18	0.08	33.79	1.82	1.60	15.50	57.80	26.70	SiL
Zacapu-002	Ah	0–12	6.74	1.70	24.03	0.36	1.09	29.18	3.12	0.95	14.70	57.40	27.90	SiCL
	Bw1	12–28	6.58	1.61	27.60	0.86	1.19	48.19	2.34	0.90	4.80	71.40	23.80	SiL
	Bw2	28–53	6.67	1.68	21.15	0.56	0.66	41.28	2.73	1.14	8.50	67.40	24.10	SiL
	Bw3	53–78	6.62	1.67	28.43	0.86	0.94	37.82	1.30	1.03	6.80	65.50	27.60	SiCL
	Bw4	78–104	6.67	1.57	28.80	0.79	0.65	49.54	0.78	1.01	3.50	60.60	35.90	SiCL
C	104–140	6.76	1.50	29.55	0.99	0.35	57.98	0.65	1.00	2.20	52.70	45.10	SiC	

Table 3. Cont.

Profile Key	Horizon	Depth cm	pH H ₂ O	Exchangeable Bases			CEC	OM	BD	Sand	Silt	Clay	Texture	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺								K ⁺
Zacapu-003	Ah	0–21	5.93	1.71	24.06	0.58	2.02	43.39	4.42	1.15	4.20	66.90	28.90	SiCL
	Bw1	21–37	6.23	1.39	27.90	0.62	0.89	48.00	5.46	1.06	1.30	60.60	38.10	SiCL
	Bw2	37–88	6.11	1.62	26.85	0.79	3.79	41.09	1.30	1.10	1.50	49.80	48.70	SiC
	Bw3	88–128	6.46	1.65	22.83	0.60	0.99	29.76	0.39	1.33	1.60	51.70	46.60	SiC
	2Bbw	128–153	6.75	1.66	22.94	0.79	0.99	25.15	0.78	1.53	2.60	67.60	29.80	SiCL
Quiroga-001	Ah	0–15	6.48	1.64	18.53	0.49	1.08	51.65	4.55	0.98	6.10	72.10	21.80	SiL
	Bt1	15–46	6.89	1.68	24.51	0.66	2.53	59.71	0.52	1.24	3.20	57.80	39.10	SiCL
	Bt2	46–63	7.02	1.66	25.54	1.01	2.02	49.73	0.78	0.93	4.10	58.90	37.00	SiCL
	Bt3	63–81	7.02	1.62	26.77	1.05	0.85	45.70	1.30	1.15	4.50	55.10	40.40	SiC
	Bt4	81–113	6.49	1.65	27.76	1.35	1.20	51.26	0.00	1.20	4.50	57.00	38.50	SiCL
Bt5	113–150	7.05	1.69	21.82	1.50	0.77	51.07	0.00	1.35	1.80	65.30	32.90	SiCL	
Quiroga-002	Ah	0–29	6.33	1.56	28.18	0.77	2.78	40.13	5.97	0.97	4.30	66.50	29.30	SiCL
	Bw	29–65	6.69	1.57	30.03	0.97	2.53	31.30	2.47	1.07	4.00	63.20	32.90	SiCL
	BwC	65–104	7.25	1.56	27.14	1.09	1.89	37.82	0.52	1.00	5.10	56.00	38.90	SiCL
	C	104–163	6.85	1.65	28.53	1.97	1.89	39.74	0.78	1.00	4.40	65.00	30.70	SiCL

CEC = cation exchange capacity (cmol kg⁻¹); OM = organic matter (%); BD = bulk density (g cm⁻³); L = loam; SL = sandy loam; SIL = silty loam; LS = loamy sand; S = sand; SiCL = silty clayey loam; SiC = silty clay.

The aptitude graphs to perform the environmental functions from the modeled scenarios were generated using the Soil and Environment software with a scale of I to V—where V represents a very high soil aptitude, IV refers to high aptitude, III is an intermediate aptitude, II represents a low aptitude, and I is a very low aptitude to perform the environmental soil function [16].

3. Results and Discussion

3.1. Soil Description

The soils in the study area reflect the characteristic features of volcanic areas and the predominant role of the parent material and relief as the shaping factors that govern them [34,35]. These soils are mostly young and deep, with a sequence of horizons of Ah–Bw–C, except for Luvisol, in which the sequence of soil horizons is A–Bt–C, and Antrosol, in which horizon A has been lost.

Five of the nine soils were classified as Andosols (Table 3), showing a reaction to the allophane test, loamy textures, silty loams, and silty clay loams, with a slightly acidic to slightly alkaline pH and variable organic matter values (Table 3). The pedoecological evaluation showed very high values for the field capacity and cation exchange capacity, as well as high values for the aeration capacity for the soils with a greater depth and lower bulk density (Table 4).

Haplic Luvisol (Andic, Cutanic, Differentic, Humic, Loamic, Magnesian, and Profondic) had a pH that ranged from very slightly acidic to very slightly alkaline, while the percentage of organic matter was intermediate for the first horizon and null for the deeper horizons (Table 3). In the pedoecological evaluation, this soil obtained intermediate values of hydraulic conductivity and aeration capacity, which were attributed to the argic horizon, which limits water filtration. The field capacity and cation exchange capacity of this soil were very high (Table 4).

Table 4. Chemical and physical properties of the soils expressed per unit area.

Profile Key	Soil	HC (cm día ⁻¹)	FC (L m ⁻²)	AC (L m ⁻²)	FE (kg m ⁻²)	CEC (mol m ⁻²)	SOC (t ha ⁻¹)
Cherán-001	Antrosol (Andic, Loamic, Sideralic)	24.5	709.95	195.31	2088.20	341.14	310.22
Cherán-002	Eutrosilic Skeletic Silandic Andosol (Profundihumic, Siltic)	123	350.45	87.35	570.61	173.00	198.26
Cherán-003	Andosol over Cambisol over Regosol	97	364.29	149.72	1082.05	391.51	131.18
Cherán-004	Eutrosilic Mollic Andosol (Siltic)	87.5	843.41	190.97	1820.88	512.76	296.24
Zacapu-002	Eutrosilic Silandic Andosol (Siltinovic)	82	450.20	82.25	1042.60	450.65	105.78
Quiroga-002	Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic)	82	431.95	78.37	923.74	389.04	149.41
Zacapu-001	Leptic Cambisol (Siltic Profundihumic)	20	311.32	67.72	1135.60	320.21	176.86
Quiroga-001	Haplic Luvisol (Andic, Cutanic, Differentic, Humic, Loamic, Magnesian, Profondic)	19.5	540.89	91.27	1635.54	857.31	71.69
Zacapu-003	Cambic Phaeozem (Andic, Clayic, Profundihumic)	16	629.45	86.45	1886.60	671.23	185.59

HC = hydraulic conductivity; FC = field capacity; AC = air capacity; FE = fine earth; CEC = cation exchange capacity; SOC = soil organic carbon.

One of the soils was a Leptic Cambisol (Siltic Profundihumic), with a silt loam texture, organic matter content that gradually decreased with depth from medium–high to low content, and a pH that was slightly acidic to very slightly acidic. The pedoecological evaluation showed very high field capacity and cation exchange values, intermediate hydraulic conductivity, and a low aeration capacity, which can make plant rooting difficult [36] (Table 4).

Another soil was a Cambic Phaeozem (Andic, Clayic, Profundihumic), with a mollic horizon of 21 cm, a pH that was slightly acidic to very slightly alkaline, and an organic matter content ranging from medium–high to very low throughout the profile (Table 3). The pedoecological evaluation showed intermediate values of hydraulic conductivity and aeration capacity, which allow plant rooting to develop satisfactorily, although with certain limitations [37] (Table 4).

An Anthrosol (Andic, Loamic, Sideralic) was also characterized, and was collected from a plain with corn cultivation, a loam and sandy loam texture, intermediate organic matter content, and a pH that was slightly acidic to very slightly alkaline (Table 3). The pedoecological evaluation showed intermediate values of hydraulic conductivity in soil profile horizons with an intermediate bulk density [31], and very high values for the field capacity, aeration capacity, and cation exchange capacity, providing appropriate conditions for agriculture [35] (Table 4).

3.2. Evaluation of Environmental Soil Functions

The aptitude of the soils to perform environmental functions varied. The historical archive function obtained high scores in sites with buried soils because this function is associated with ancient soil formations, indications of historical use, or conserved environmental conditions [16,20] (Table 5).

Table 5. Environmental soil functions (1: very low; 2: low; 3: intermediate; 4: high; 5: very high).

Profile Key	HH	N	N (Mod)	NA	CA	DOC	RA (Qa)	RA (Qu)	NR	SHV (5 cm)	AQ	AQ (Mod)
Cherán-001	4	1	1	1	1	2	4	5	5	3	5	4
Cherán-002	4	4	5	1	1	5	3	5	4	3	5	3
Cherán-003	1	4	4	5	1	4	3	5	5	4	5	3
Cherán-004	4	4	1	1	1	2	3	5	5	3	5	3
Zacapu-002	4	4	4	5	1	3	3	5	5	4	3	1
Quiroga-002	3	4	5	1	1	5	3	5	5	3	5	3
Zacapu-001	4	4	1	1	1	2	4	3	5	3	3	2
Quiroga-001	5	4	4	1	1	2	5	3	5	4	3	2
Zacapu-003	5	4	4	5	1	2	4	3	5	3	3	2

HH = human habitat; N = naturalness; N (Mod) = naturalness modified; NA = natural archive; CA = cultural archive; DOC = decomposition of organic compounds; RA = recharge of aquifers; Qa = quality; Qu = quantity; NR = nutrient retention; SHV = sorption of heavy metals; AQ = agricultural quality; AQ (Mod) = agricultural quality modified.

The human habitat function allowed us to identify soils suitable for human settlements. For this function, the presence of contaminants and the generation of dust and humidity in the environment were evaluated, which are factors that can have negative repercussions on human health [17]. The Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic) had medium aptitude levels with respect to its ability to perform this function is a result of its weak aggregate stability, causing dust formation, which can potentially cause gastric or pulmonary diseases [18]. The fact that Andosol was more highly evaluated than Cambisol and Regosol evidenced the need to complement the evaluation by considering natural risk factors. Since Andosol was located on a mountain, its initial (very high) aptitude was changed to a very low aptitude by considering the risks associated with sites with steep slopes, such as mass movements [2].

In the evaluation of the function of soil naturalness, sites without anthropic alterations were identified, since these sites may be appropriate for the conservation of native plants and animals [18,38]. The soils were evaluated as having a high aptitude to perform this function, except for Anthrosol (Andic,

Loamic, Sideralic), which had a very low aptitude due to its agricultural use. In order to improve the evaluation of this environmental function, we proposed integrating other indicators, such as the soil management, cover type, and thickness of horizon A; in this way, a conserved soil with a deep A horizon would indicate a more natural soil [39]. Using this criterion, two soils improved their evaluation results to very high: the Eutrosilic Skeletic Silandic Andosol (Profundihumic, Siltic) and the Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic) (Table 5).

The function of decomposing organic compounds obtained low scores in five of the nine evaluated soils (Table 5). This environmental function is based on the capacity of microorganisms to produce, decompose, and transform chemical substances [17,20]. The soils that obtained the lowest scores had intermediate values of organic matter content and/or a structure of subangular blocks (Table 2). A better evaluation of this function could take into account: (a) the number of fine roots of plants, since these can exude organic compounds that promote microbial activity [40], and (b) the cation exchange capacity, since this influences the adsorption of microbial enzymes that decompose organic matter [41].

To assess the aquifer recharge function, the capacity of soils to filter and infiltrate water was evaluated. This environmental function assesses hydraulic conductivity using the (a) field capacity to infer water quality and (b) aeration capacity to estimate the amount of natural recharge water [20,33]. These soils have the peculiarity of having a high-water retention capacity, which is reflected in the high values of the field capacity. Water can filter through the profile of these soils, but not quickly; thus, lowering their aptitude, mainly for Andosols, could generate a more reliable scenario.

The function of sorption of heavy metals by soils is of great importance for urban environments, since it is in cities where human beings agglomerate, and their health can be affected [8,16,42]. The properties of the soils used to assess this environmental function were the pH, organic matter content, and clays, since these have the greatest influence on the sorption of heavy metals [8]. The evaluated soils had intermediate and high scores at a depth of 5 cm, mainly due to their pH values (Table 3).

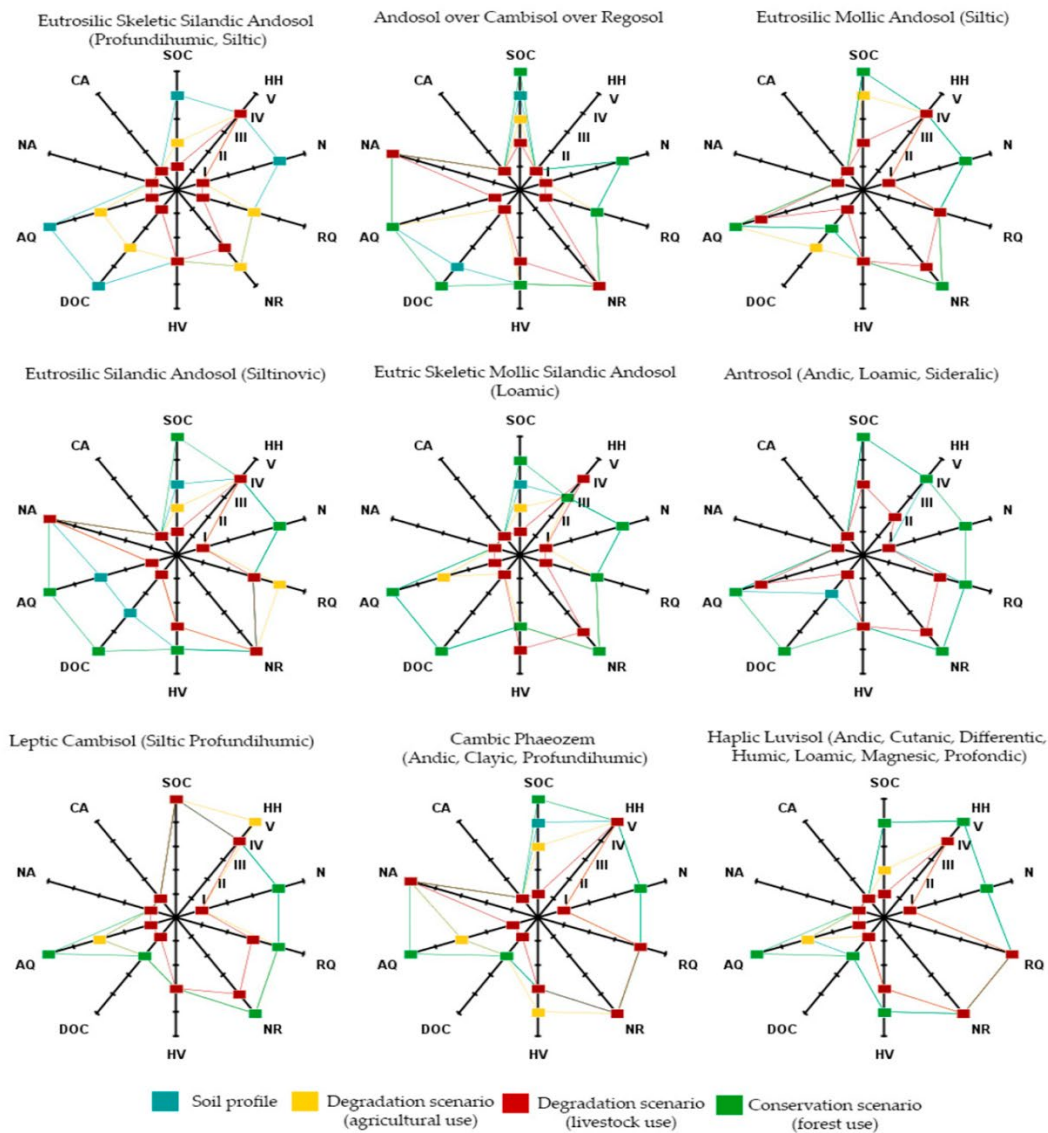
The agricultural quality function obtained high scores in five of the nine evaluated soils (Table 5). This environmental function is based on soil properties that favor the growth of plants and crops [16,38]. The evaluation of this environmental function might be improved by considering limiting factors for agriculture, such as the slope, which is associated with erosion [43]. Another factor that reduces the agricultural quality of soils is the presence of coarse surface fragments, which hinder tillage [44]. In the specific case of Andosols, this group of soils retains a large amount of phosphates, which greatly reduces their suitability for agriculture [35]. Electrical conductivity should also be taken into account as a factor that reduces the agricultural quality of soils, as it is a direct indicator of the presence of salts, which can cause plants to undergo osmotic stress [45]. The previous suggestions were applied to the evaluation models. In the case of Andosols, two aptitude classes were subtracted by simulating the loss of fertility due to the retention of phosphates. As for the soils with andic characteristics, only one class was subtracted after performing this correction. None of the evaluated soils reached a very high class, which we consider to be more accurate (Table 5).

The nutrient retention function is based on the evaluation of the natural fertility of soils [15,38]. All the soils under study obtained a very high score, which indicates that they have a good ability to retain and release nutrients for plants, with a low risk of loss by leaching [20]. The soil properties that were used to assess this function were the amount of fine earth, the capacity to adsorb interchangeable cations, and the structure and texture of the soil, all of which are highly important for the supply of nutrients [46]. To improve the evaluation of this environmental function, we proposed the adoption of a criterion like that of agricultural quality.

The assessment of the soil organic carbon content function allowed the content of organic carbon in tons per hectare to be calculated for each soil profile. The deepest soils presented the highest amount of organic carbon (Table 4), such as the Antrosol (Andic, Loamic, Sideralic) and the Eutrosilic Mollic Andosol (Siltic).

Degradation and Conservation Models

The conservation model with forest soil use showed that the naturalness of soils increased with depth in the A horizon. The capacity to decompose organic compounds and the agricultural quality of the soils improved as the organic matter content and aeration capacity increased. The scores corresponding to the human habitat function, archival function, aquifer recharge function, nutrient retention, and heavy metal adsorption remained mostly the same, without any significant changes. This is because the properties of the soils that were considered for each of these functions improved, but not enough to reach a higher score; it was also the case that the soils in their original state had already been evaluated as having the best aptitude for some of these functions (Figure 2).



HH = human habitat; N= naturalness; NA = natural archive; CA = cultural archive; DOC = decomposition of organic compounds; RA = recharge of aquifers; NR = nutrient retention; SHV = sorption of heavy metals; AQ= agricultural quality

I: very low; II: low; III: intermediate; IV: high; V: very high

Figure 2. Modeling scenarios of the degradation and conservation of soils due to their use.

Modeling this type of soil use allowed us to identify the capacities that the soils have possibly lost with their current uses. In the case of Antrosol (Andic, Loamic, Sideralic), a significant change in capacity was expected; however, only the decomposition of organic compounds and the naturalness of the soil presented significant improvements. This indicates that although this soil has lost important capacities, it is still able to perform other functions.

The degradation model with agricultural soil use showed that the erosion of the A horizon results in a complete loss of naturalness of the soils. The ability to decompose organic compounds was also significantly reduced and agricultural quality was slightly affected. Nevertheless, the human habitat function, archival function, aquifer recharge function, and nutrient retention remained unchanged or showed no significant changes (Figure 2). The function of the sorption of heavy metals did show significant changes, with the scores of some soils improving at a 30 cm depth. This happened because, in these soils, the subsurface horizons have pH values of around 7, which benefits this environmental function [8]. This model showed a major negative change in the capabilities of the Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic) and the Eutrosilic Skeletic Silandic Andosol (Profundihumic, Siltic).

The effects of agriculture on soil are usually associated with negative aspects, such as erosion by tillage, compaction, a loss of soil structure, nutrient degradation, and salinity [47]. However, in the case of the soils studied here, the capacity to regulate heavy metals improved. The functions that are key for this type of soil use, such as agricultural quality and nutrient retention, are still effectively performed according to the characteristics of the evaluation technique used [15,20].

The degradation model with livestock soil use showed that the disappearance of the A horizon and part of the B horizon results in a total loss of naturalness and a drastic decrease in the capacity of the soil to decompose organic compounds. The agricultural quality score was also significantly reduced, and the functions of aquifer recharge and nutrient retention were also affected. The functions related to human habitat and heavy metal adsorption decreased by very little at a 5 cm depth, while heavy metal adsorption improved in Andosol, which obtained higher scores than Cambisol, Regosol, and Eutrosilic Skeletic Silandic Andosol (Profundihumic, Siltic). The most vulnerable soils in the scenario of livestock use were again the Eutrosilic Skeletic Silandic Andosol (Profundihumic, Siltic) and Eutric Skeletic Mollic Silandic Andosol (Loamic), as well as Andosol, over Cambisol and Regosol. Therefore, it is recommended that the current use of these soils is maintained to preserve their environmental functions.

Given that the decrease in the capacity of the soils was considered significant before running this degradation model (Figure 2), it is suggested that the soils selected for livestock use should have characteristics that provide resistance to the degradation factors associated with grazing [48]; for example, coarse textured soils that minimize the effects of compaction by trampling. It is also suggested that soils with low scores for their environmental soil functions are selected.

Environmental soil functions are a broad concept that can include ecosystem services and pedoecological properties. An evaluation of these functions must consider the physical and chemical properties of the soil, as well as soil management practices and the cultural and geological history of the complete soil profile [16]. The Soil & Environment software evaluated soil properties that can be associated with ecosystem support services, regulation, culture, and soil provision services [14,46,49,50]. The evaluations carried out using the Soil & Environment software were based on a quantitative, objective analysis of the ecosystem services of the soil, considering the entire soil profile, not only the arable layer or the surface horizons of conserved sites [16,17,33].

This study will serve as an input for modifying and improving the evaluation algorithms of the Soil & Environment software. In the future, these evaluation models could provide results in economic terms that would better communicate the value of soil for different users.

The growing degradation of the world's soils urgently requires the modernization of soil science, which should consist of the generation of information and communication technologies to: (a) generate thousands of millions of data at the level of the soil profile with proximal sensors; (b) the analysis of large databases with apps and software for evaluating the environmental soil functions; and (c) transfer

the pedological information to the decision makers. All of this is part of the new line of work, soil security [51,52].

4. Conclusions

The method and algorithms employed for assessing the functions of soil naturalness and agricultural quality should be improved for the evaluation of soils in volcanic zones. The estimating method of aeration capacity and hydraulic conductivity should be calibrated for the particular characteristics of the Andosols.

The modeling of scenarios in this case was very particular due to the soil management practices of the local farmers, which change from forest to corn cultivation and then to livestock use. However, in other cases, the dynamics of land use may be totally different and thus the models must be different. In this case, the modeling of scenarios provided a clear idea of the negative and positive effects that a change in land use could have. The models also served to identify the soil profiles that are most vulnerable to disturbance, as well as the soil profiles with agricultural or livestock potential.

Given the current need to ensure the security, conservation, and improvement of soil resources, a quantitative evaluation of the environmental functions of soil allows us to recognize the value of soil profiles and to develop sustainable management strategies to produce food, fibers, textiles, fresh water, etc., as well as to preserve diversity and rely on soil functions as a buffer against pollution and climate change.

Author Contributions: Formal analysis, Á.G., D.L.-C. and F.B.; funding acquisition, F.B.; investigation, Á.G., D.L.-C. and F.B.; methodology, A.G., D.L.-C. and F.B.; project administration, F.B.; Resources, F.B.; Software, Á.G. and F.B.; Supervision, F.B.; Writing—original draft, Á.G., D.L.-C. and F.B.; Writing—review & editing, Á.G. and F.B.

Funding: This research was funded by DGAPA of the National Autonomous University of Mexico, grant number IN209218, within the research project “Generación de modelos de evaluación ambiental del perfil del suelo en zonas volcánicas y de karst”.

Acknowledgments: We thank the Mexican company Acts with Science for providing the user license from the Soil and Environment software.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References


1. ELD Initiative. *Report for Policy and Decision Makers: Reaping Economic and Environmental Benefits from Sustainable Land Management*, 1st ed.; German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development: Bonn, Germany, 2015.
2. Goudie, A. *Human Impact on the Natural Environment: Past, Present and Future*, 8th ed.; John Wiley & Sons: Oxford, UK, 2018; 422p.
3. Lal, R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food. Secur.* **2009**, *1*, 45–57. [CrossRef]
4. De la Rosa, D.; Mayol, F.; Díaz-Pereira, E.; Fernández, M.; De la Rosa, D. A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection: With special reference to the Mediterranean region. *Environ. Model. Softw.* **2004**, *19*, 929–942. [CrossRef]
5. Food and Agriculture Organization of The United Nations (FAO). *Guidelines for Soil Description*, 4th ed.; Management Service Information Division FAO: Rome, Italy, 2006.
6. Schoeneberger, P.J.; Wysocki, D.A.; Benham, E.C. *Field Book for Describing and Sampling Soils*, 3rd ed.; National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service: Lincoln, NE, USA, 2012.
7. INEGI Fisiografía. Available online: <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/#> (accessed on 10 July 2019).
8. Bautista, F.; Campuzano, E.; Delgado, C.; Goguitchaichvili, A. Índices de sorción de metales pesados en suelos urbanos: El caso de Morelia. *Boletín Soc. Geológica Mex.* **2017**, *69*, 433–445. [CrossRef]
9. Baveye, P.C.; Baveye, J.; Gowdy, J. Soil ecosystem services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Front. Environ. Sci.* **2016**, *4*, 41. [CrossRef]
10. Blum, W.E. *Problems of Soil Conservation, Nature and Environment Series No. 39*; Council of Europe: Strasbourg, France, 1988.

11. Omuto, C.; Nachtergaele, F.; Rojas, R.V. *State of the Art Report on Global and Regional Soil Information: Where are We? Where to Go?* 1st ed.; FAO: Rome, Italy, 2013.
12. Celio, E.; Koellner, T.; Grêt-Regamey, A. Modeling land use decisions with Bayesian networks: Spatially explicit analysis of driving forces on land use change. *Environ. Model. Softw.* **2014**, *52*, 222–233. [[CrossRef](#)]
13. Hans-Georg, F.; Bach, M.; Fohrer, N.; Breuer, L. Interdisciplinary modeling and the significance of soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2002**, *165*, 460–467. [[CrossRef](#)]
14. Robinson, D.A.; Jackson, B.M.; Clothier, B.E.; Dominati, E.J.; Marchant, S.C.; Cooper, D.M.; Bristow, K.L. Advances in soil ecosystem services: Concepts, models, and applications for earth system life support. *Vadose Zone J.* **2013**, *12*. [[CrossRef](#)]
15. Gallegos-Tavera, Á.; Bautista, F.; Álvarez, O. Software Assofu to assess environmental soil functions. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambient.* **2014**, *20*, 237–249. [[CrossRef](#)]
16. Bautista, F.; Gallegos, A.; Pacheco, A. *Analysis of the environmental functions of soil profile data (Soil & Environment)*, 2nd ed.; Skiu: Ciudad de México, México, 2016.
17. Gallegos, A.; Bautista, F.; Dubrovina, I. Software to evaluate the environmental functions of soils. *Softw. Syst.* **2016**, *2*, 195–200. [[CrossRef](#)]
18. Bedolla-Ochoa, C.; Bautista, F.; Gallegos, Á. Environmental functions of smallholder farmer land classes in the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve, México. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambient.* **2018**, *3*, 265–274. [[CrossRef](#)]
19. Muñoz-Rojas, M.; Doró, L.; Ledda, L.; Francaviglia, R. Application of CarboSOIL model to predict the effects of climate change on soil organic carbon stocks in agro-silvo-pastoral Mediterranean management systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2015**, *202*, 8–16. [[CrossRef](#)]
20. Lehmann, D.; David, S.; Stahr, K. *TUISEC—Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils*; Universität Hohenheim Bodenkundliche Hefte: Stuttgart, Germany, 2008; ISSN 0942-0754.
21. Aguilar, Y.; Bautista, F.; Mendoza, M.; Frausto, O.; Ihl, T.; Delgado, C. Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mex. Ing. Química* **2016**, *3*, 913–933.
22. Rzedowski, J. *Vegetación de México*, 2nd ed.; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: Ciudad de México, México, 2006.
23. Arredondo-León, C. Estado y dinámica del paisaje forestal en el municipio Cherán, Sierra Tarasca, Michoacán. *Rev. Mex. Ciencias For.* **2017**, *8*, 7–24.
24. Velázquez, A.; Toledo, V.; Luna, I. Mexican temperate vegetation. In *North American Terrestrial Vegetation*; Barbour, M., Billings, D., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2000; pp. 573–592.
25. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Prontuario de Información Geográfica Municipal de Los Estados Unidos Mexicanos*; INEGI: Ciudad de México, México, 2009.
26. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. In *International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*, 2015th ed.; World Soil Resources Reports No. 106; World Soil Resources: Rome, Italy, 2014.
27. Munsell Color Company. *Munsell Soil Color Charts*; Munsell Color Company: Boston, MA, USA, 2000.
28. Nelson, D.; Sommers, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*; Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., Eds.; American Society of Agronomy and Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 1982; pp. 539–577.
29. Rhoades, J. Cation exchange capacity. In *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph*; Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., Eds.; American Society of Agronomy, Inc.: Madison, WI, USA, 1982; pp. 178–190.
30. Day, R.P. Pipette method of particle size analysis. In *American Society of Agronomy*; Black, C.A., Ed.; Methods of Soil Analysis: Madison, WI, USA, 1965; pp. 553–562.
31. Siebe, C.; Janh, R.; Stahr, K. *Manual Para la Descripción y Evaluación Ecológica de Suelos en el Campo*, 4th ed.; Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.: México, 2006.
32. Skiu. Soil and Environment (S&E). Available online: <https://www.actswithscience.com/se-2/> (accessed on 12 August 2019).
33. Bautista, F.; Barajas, A.; Cortés, J.L.; Olivares, L.D.; Gallegos, Á.; Pérez, A. Los costos ambientales de la pérdida de suelo en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato. *GEOS* **2016**, *36*, 309–315.
34. Alcalá, J.M.; Ortiz-Solorio, C.A.; Gutiérrez-Castorena, M.C. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoam.* **2001**, *19*, 227–239.


35. Sedov, S.N.; Solleiro-Rebolledo, E.; Gama-Castro, J.E. Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: Timing, mechanisms and environmental setting. *CATENA* **2003**, *54*, 495–513. [[CrossRef](#)]
36. Schöning, I.; Kögel-Knabner, I. Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. *Soil Biol. Biochem.* **2006**, *38*, 2411–2424. [[CrossRef](#)]
37. Flessa, H.; Amelung, W.; Helfrich, M.; Wiesenberg, G.L.B.; Gleixner, G.; Brodowski, S.; Rethemeyer, J.; Kramer, C.; Grootes, P.M. Storage and stability of organic matter and fossil carbon in a Luvisol and Phaeozem with continuous maize cropping: A synthesis. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2008**, *171*, 36–51. [[CrossRef](#)]
38. Lehmann, A.; Stahr, K. The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use. *J. Soils Sediments* **2010**, *10*, 1092–1102. [[CrossRef](#)]
39. Westphal, C.; Härdtle, W.; Oheimb, G. Forest history, continuity and dynamic naturalness. In *Forest Biodiversity: Lessons from History for Conservation*; CABI: Wallingford, Oxfordshire, UK, 2004; pp. 205–220.
40. Lynch, J.M.; de Leij, F. Rhizosphere. 2012. Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470015902.a0000403.pub2> (accessed on 22 August 2019). [[CrossRef](#)]
41. Romani, A.M.; Fischer, H.; Mille-Lindblom, C.; Tranvik, L.J. Interactions of bacteria and fungi on decomposing litter: Differential extracellular enzyme activities. *Ecology* **2006**, *87*, 2559–2569. [[CrossRef](#)]
42. Lehmann, A.; David, S.; Stahr, K. *Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils*, 2nd ed.; Hohenheimer Bodenkundliche Hefte: Landeshauptstadt München, Germany, 2013.
43. Bridges, E.M.; Oldeman, L.R. Global assessment of human-induced soil degradation. *Arid Soil Res. Rehabil.* **1999**, *13*, 319–325. [[CrossRef](#)]
44. De la Rosa, D.; Anaya-Romero, M.; Díaz-Pereira, E.; Heredia, N.; Shahbazi, F. Soil-specific agro-ecological strategies for sustainable land use—A case study by using MicroLEIS DSS in Sevilla Province (Spain). *Land Use Policy* **2009**, *26*, 1055–1065. [[CrossRef](#)]
45. Bohnert, H.J.; Jensen, R.G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends Biotechnol.* **1996**, *14*, 89–97. [[CrossRef](#)]
46. Dubrovina, I.; Bautista, F. Analysis of the suitability of various soil groups and types of climate for avocado growing in the state of Michoacán, México. *Eurasian Soil Sci. Agric. Chem. Soil Fertil* **2015**, *5*, 491–503. [[CrossRef](#)]
47. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Status of the World's Soil Resources*; FAO: Rome, Italy, 2015.
48. Greenwood, K.L.; McKenzie, B.M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: A review. *Aust. J. Exp. Agric.* **2001**, *41*, 1231–1250. [[CrossRef](#)]
49. Blum, W. Functions of soil for society and the environment. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **2005**, *4*, 75–79. [[CrossRef](#)]
50. Costanza, R.; d'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.V.; Paruelo, J.; et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **1997**, *387*, 253–260. [[CrossRef](#)]
51. McBratney, A.; Field, D.J.; Koch, A. The dimensions of soil security. *Geoderma* **2014**, *213*, 203–213. [[CrossRef](#)]
52. McLean, J.; McBratney, A.; Field, D.; Kidd, K.; Stockmann, U.; Liddicoat, C.; Grover, S. Soil Security for Australia. *Sustainability* **2019**, *11*, 3416. [[CrossRef](#)]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Capítulo IV. Uso de la cartografía pedológica y digital para representar las funciones ambientales de los suelos de Michoacán



4.1 Introducción

Los suelos juegan un papel fundamental para el desarrollo sostenible de la humanidad a través de las funciones que desempeñan (McBratney et al., 2014). La importancia de las funciones de los suelos radica en los bienes y servicios que ofrecen, tales como producción de biomasa; almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes, sustancias y agua; reserva de la biodiversidad; entorno físico y cultural; fuente de materias primas; archivo geológico e histórico; reserva de carbono (CCE, 2006; Bouma, 2009); y reactor ambiental (Aguilar & Bautista, 2011).

La integración de las funciones de los suelos en los planes de planificación territorial y establecimiento de políticas públicas es fundamental para lograr el uso sostenible de los suelos (Bouwma et al., 2018). En este sentido, se requiere información edafológica de calidad, de rápida generación, fácil manejo y analizada espacialmente para mantener el buen estado de los suelos, lo cual que se puede traducir en una buena calidad de vida para los seres humanos (Pereira et al., 2018).

Actualmente se reconocen dos enfoques para el análisis espacial de los suelos: el tradicional y digital. Los mapas de suelos digitales son una alternativa que ofrece un enfoque cuantitativo y menor inversión de recursos (Minasny y McBratney, 2016). Los mapas tradicionales se han utilizado principalmente en áreas donde existe una gran diversidad de factores y procesos de formación de los suelos, o donde se dispone de observaciones de suelos limitadas y no distribuidas de manera homogénea (Riveccio et al., 2019).

La aplicación de las técnicas del enfoque digital ha permitido la inferencia de propiedades de los suelos que usualmente no se registran, son de difícil medición, o que requieren una determinación más objetiva (Hartemink 2015; Gallegos et al., 2021), esto ha ofrecido la posibilidad de enriquecer las bases de datos de suelos para la generación de mapas que van más allá de la representación de la distribución espacial de las clases y propiedades de los suelos, dirigiéndose hacia su interpretación, a través de las funciones o servicios ecosistémicos que desempeñan.

En este sentido, el objetivo de este capítulo fue proponer una metodología híbrida para la elaboración de los mapas de las funciones ambientales de los suelos que integre el enfoque geopedológico y las técnicas del mapeo digital de suelos.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde al estado de Michoacán de Ocampo, México. Su superficie forma parte de las provincias Sierra Madre del Sur y Eje Neovolcánico Transmexicano (Figura 3). Desde el suroeste hacia el nororiente del estado dominan las sierras, al centro se pueden encontrar zonas bajas representadas por lomeríos y valles; y hacia el nororiente existen sierras, lomeríos, y sierras de origen volcánico con pequeñas planicies y valles (Ihl, 2019).

Los climas del estado abarcan desde el seco estepario (BS) al centro, hasta el templado con lluvias de verano (Cw) en el norte, el tropical con lluvias de verano (Aw) en el sur, y el templado con lluvias todo el año en las partes altas del Eje Neovolcánico Transmexicano (Bautista et al., 2019). La temporada de lluvias ocurre principalmente en los meses de julio a septiembre, se pueden encontrar duraciones de longitud de periodo de crecimiento que van desde los seis hasta los tres meses (Montiel et al., 2019).

Los tipos de roca que se encuentran al norte del estado son principalmente ígneas extrusivas e intrusivas, y en el sur sedimentarias y metamórficas. Los tipos de cubierta vegetal y uso de suelo son principalmente vegetación secundaria arbustiva y arbórea de selva baja caducifolia en el sur y centro, y vegetación secundaria arbustiva y arbórea de bosque de pino-encino y encino, bosque de pino-encino y uso agrícola en el norte del estado (INEGI, 2016).

Para el estado se han reportado 14 de las 18 unidades de suelos identificadas en la República Mexicana, las más importantes son: a) suelos zonales, Luvisols y Andosols; b) intrazonales, Vertisols, Solonchack, y Gleysols; y c) azonales, Leptosols, Cambisols, Regosols y Fluvisols (Bedolla-Ochoa et al., 2019).

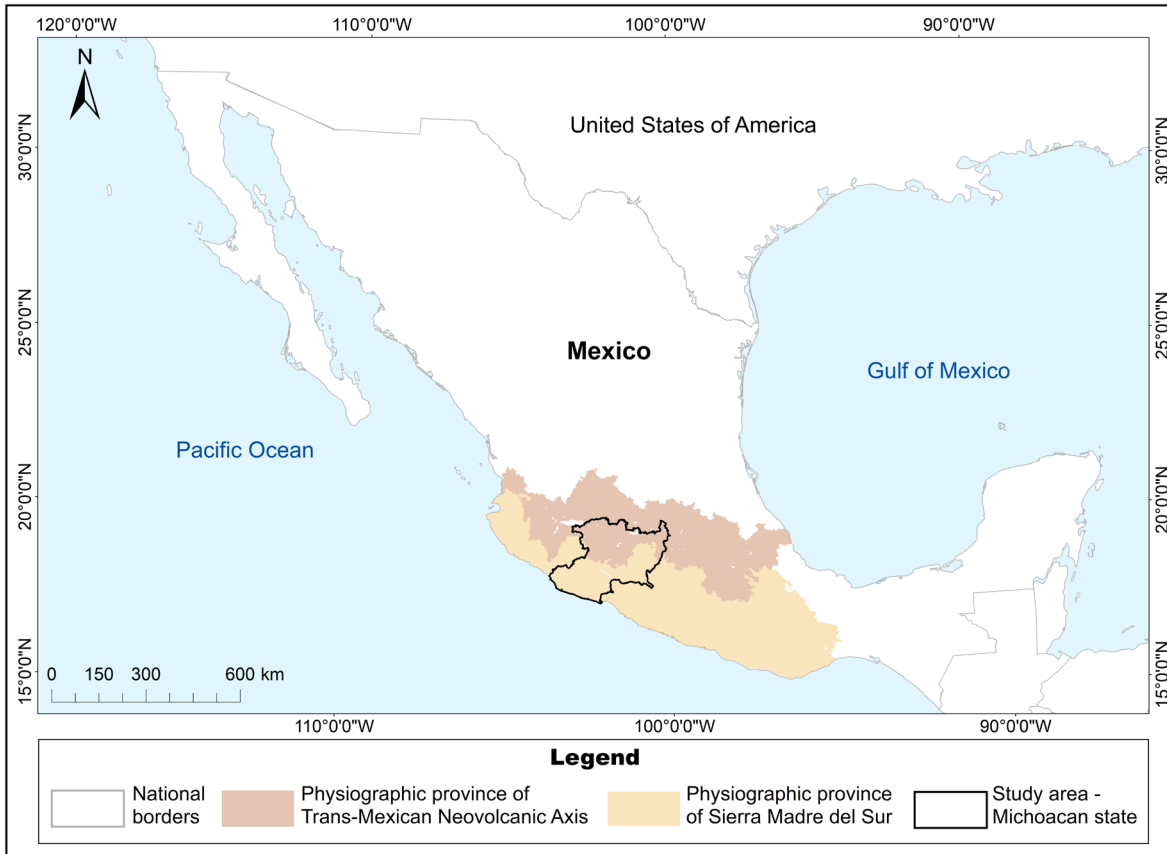


Figura 3. Localización del área de estudio

4.2.2 Mapa geopedológico

La parte tradicional de la metodología híbrida se abordó a través de la geopedología. La geopedología es un enfoque que combina principios pedológicos y geomorfológicos para establecer unidades de mapeo y analizar la distribución de los suelos en el paisaje (Zinck, 2012). El enfoque geopedológico se utilizó ya que pone énfasis en el contexto geomorfológico como factor principal de formación y distribución espacial de los suelos, lo cual es fundamental para el mapeo de áreas geológicamente recientes, como las del estado de Michoacán. En este sentido, la parte geomorfológica definió los contornos de las unidades de mapeo y la pedológica el contenido de estas unidades.

Para la determinación de los paisajes geomorfológicos se realizó una reclasificación de geoformas del modelo propuesto por Bocco et al. (2001). Se aplicó una disección vertical, y con base en la clasificación de Priego et al. (2010) se identificaron montañas (>101 m km⁻¹

²), lomeríos (41-100 m km⁻²), planicies acolinadas (16-40 m km⁻²), planicies onduladas (2.6-15 m km⁻²) y planicies subhorizontales (≤ 2.5 m km⁻²). Se realizó una comprobación manual de los tipos de geoformas que resultaron, los piedemontes y valles se mantuvieron de la capa de datos original (Figura 4).

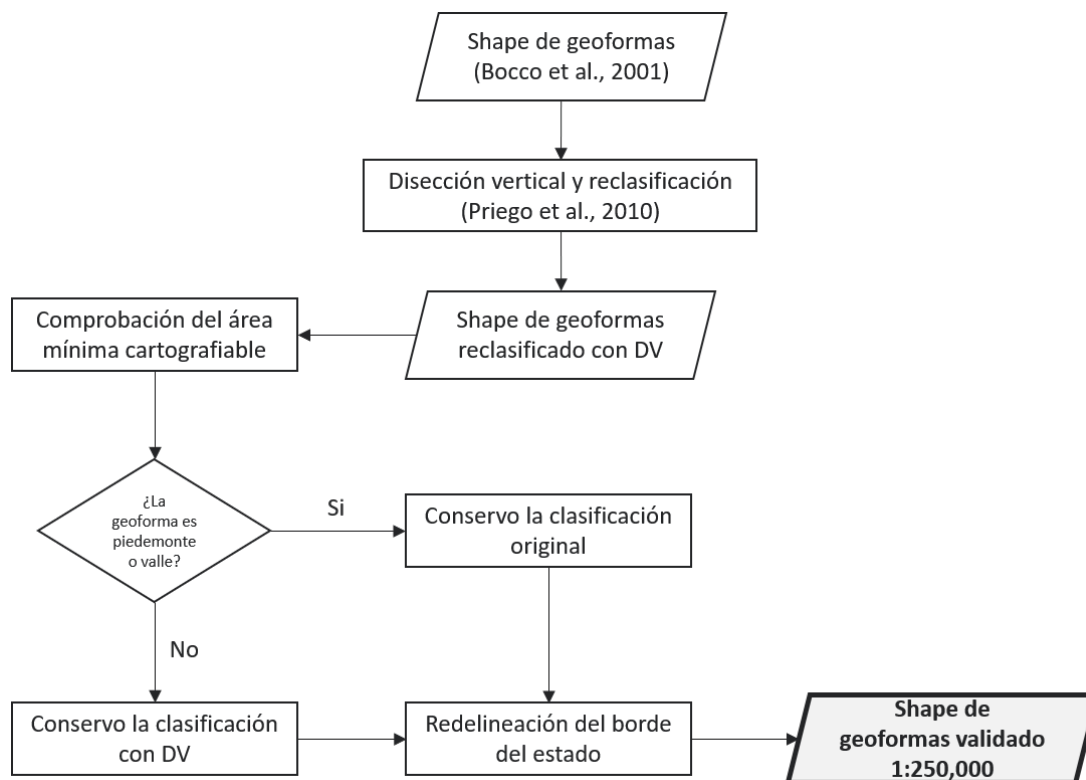


Figura 4. Proceso de validación de la capa de geoformas

La tabla de atributos de los paisajes geomorfológicos se completó mediante la unión espacial de los datos de litología (SGM, 2015), clasificación climática (INEGI, 2008), isobioclimas (Gopar et al., 2015), longitud de periodo de crecimiento (Montiel et al., 2019) y uso de suelo y vegetación (INEGI, 2017) (Cuadro 1). Todos los mapas presentados en este capítulo de tesis se crearon utilizando el software ArcGIS 10.5 (Esri, 2016).

La unión y generalización espacial de los datos se realizó mediante la creación de scripts en lenguaje Python, con la finalidad de agilizar el procesamiento de la información espacial. Mediante los scripts se calculó y asignó el valor del área dominante de los polígonos de las capas de datos ambientales por paisaje geomorfológico. En primer lugar, se recortó la información de la capa de datos ambiental utilizando la instrucción

Clip_analysis y el contorno del polígono del paisaje geomorfológico; posteriormente, con la instrucción *CalculateField* de la librería *arcpy* se calculó el área de cada polígono de la capa de datos ambiental recortada (Esri, 2021).

Se almacenaron las capas de datos resultantes del proceso anterior, y con un ciclo *for* y condicionales *if* y *elif* se obtuvo la información del polígono con el área mayor; esta información se colocó en la capa de datos de los ambientes geomorfológicos utilizando las instrucciones *getValue* y *updateRow* (Esri, 2021). Finalmente, de forma manual se realizó una generalización espacial supervisada por polígono de paisaje geomorfológico (Figura 5). A continuación, se muestra un ejemplo de fragmento de código de los scripts:

```
cursor = arcpy.UpdateCursor(directorio_shape_paisajes)
for fila in cursor:
    cve = fila.getValue("FID")

    if cve >= 0:
        geoforma = str(fila.getValue("FID"))
        arcpy.Select_analysis(in_features= directorio_shape_paisajes,
out_feature_class=directorio_destino + "/Geo" + geoforma + ".shp", where_clause=
"FID = " + geoforma)
        arcpy.Clip_analysis(in_features=directorio_shape_dividir,
clip_features=directorio_destino + "/Geo" + geoforma + ".shp",
out_feature_class=directorio_destino + "/Lito" + geoforma + ".shp",
cluster_tolerance="")
        arcpy.CalculateField_management(directorio_destino + "/Lito" + geoforma
+ ".shp", "Shape_Area", "float('!shape.area@squaremeters!')", "PYTHON")

        cursor_lito = arcpy.SearchCursor(directorio_destino + "/Lito" + geoforma
+ ".shp")
        contador_lito = 0
        for fila_lito in cursor_lito:
            if contador_lito == 0:
                Area_Mayor = fila_lito.getValue("Shape_Area")
                Tipo_Mayor = fila_lito.getValue("LITOLOGIA")

            elif contador_lito > 0:
                Area = fila_lito.getValue("Shape_Area")
                Tipo = fila_lito.getValue("LITOLOGIA")

                if Area_Mayor < Area:
                    Area_Mayor = Area
                    Tipo_Mayor = Tipo

            contador_lito = contador_lito + 1

        fila.setValue("ROCA_TIPO", Tipo_Mayor)
        cursor.updateRow(fila)
```

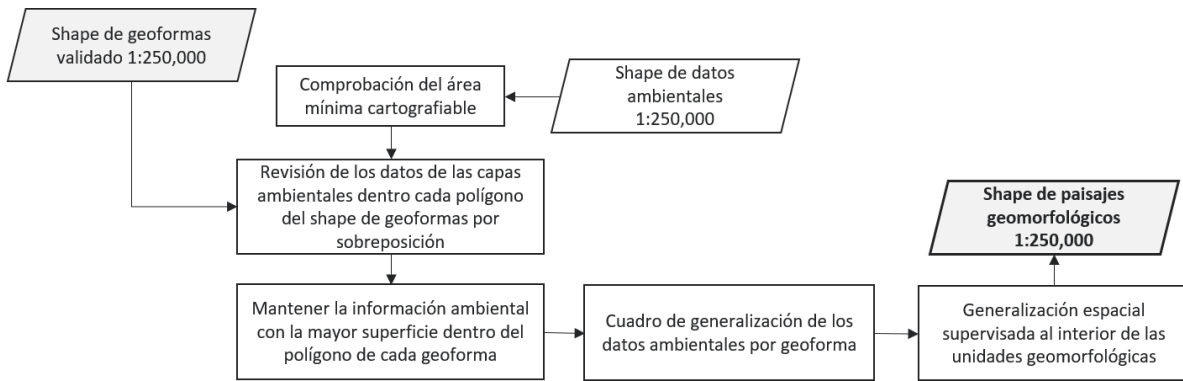


Figura 5. Proceso para la generación de la capa de paisajes geomorfológicos

La distribución de los suelos se determinó agregando datos de perfiles de suelos georreferenciados a sus respectivos paisajes geomorfológicos, se representaron máximo tres grupos de suelos dominantes por paisaje (Figura 6). Se utilizaron datos de perfiles de suelos, recopilados de a) las series I (120 perfiles) y II (99 perfiles) del INEGI (2004; 2013); b) datos de estudios de suelos anteriores (67 perfiles) (Bedolla-Ochoa et al., 2018); y c) datos de un muestreo de suelos realizado en el área de estudio (25 perfiles) (Figura 7).

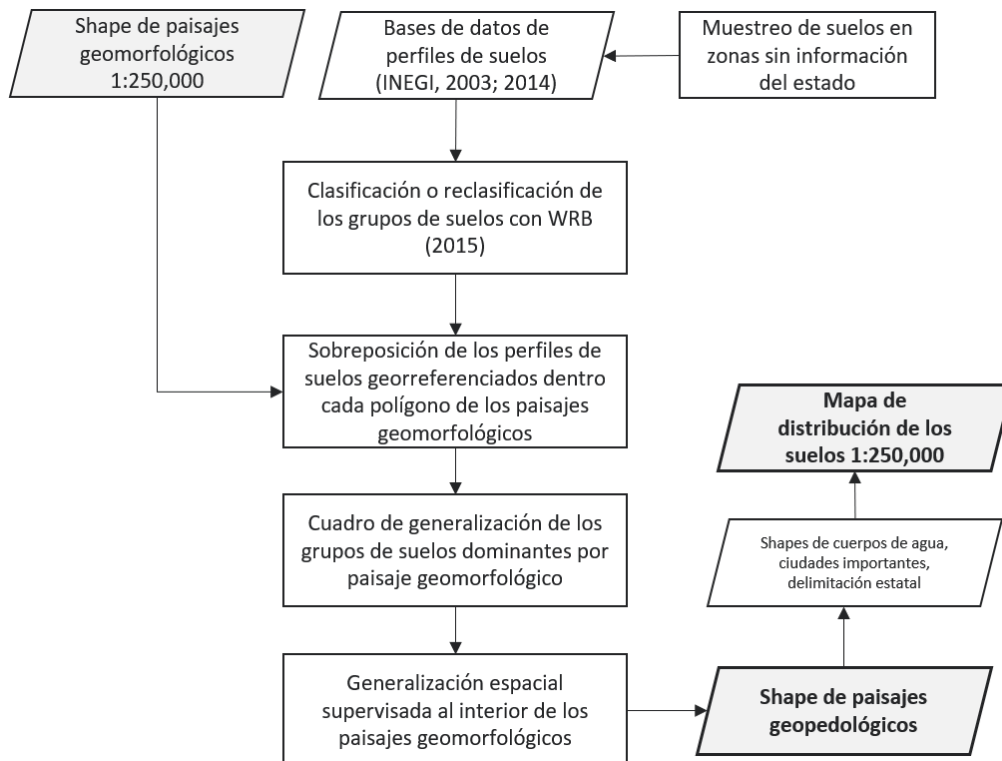


Figura 6. Proceso para la generación del mapa de la distribución espacial de los suelos

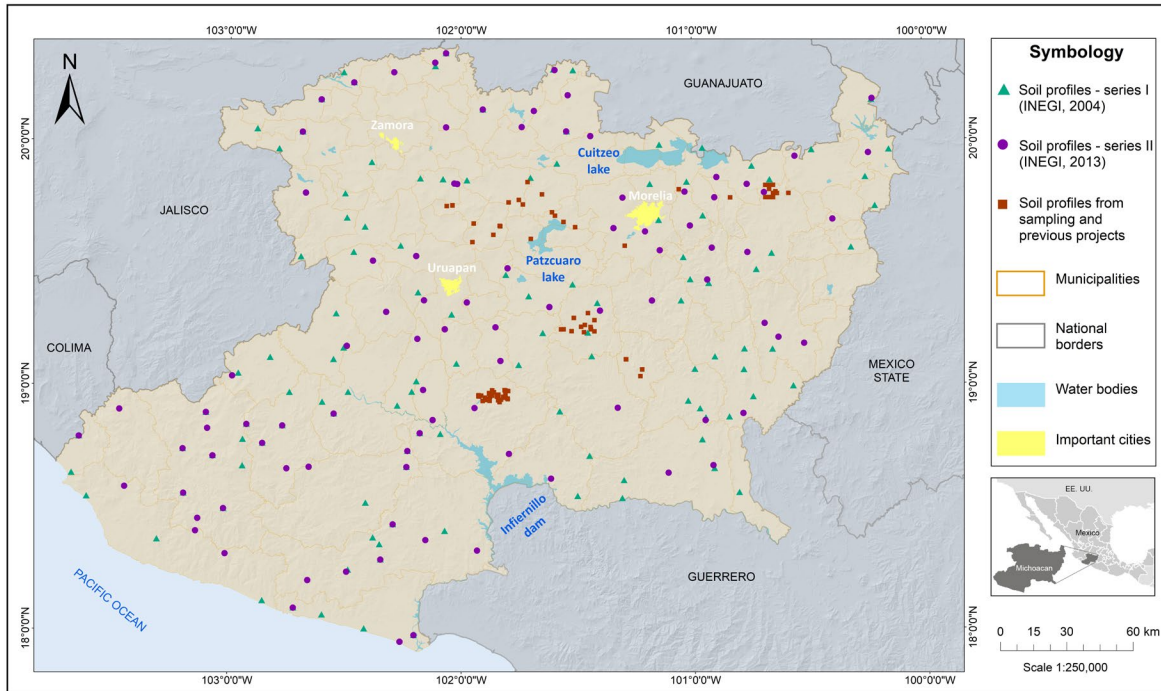


Figura 7. Distribución de los perfiles de suelos en el área de estudio

El muestreo de suelos se realizó en el año 2018. Se consideraron zonas sin información del estado, la selección de los puntos de muestreo se hizo por municipios, de tal forma que por cada tipo de geoforma dentro de los municipios fue descrito un perfil de suelo. En total se describieron 25 perfiles de suelos ubicados principalmente en el Eje Neovolcánico Transmexicano. Los suelos fueron clasificados o reclasificados (perfiles de las series I y II del INEGI) de acuerdo con los estándares de la Base de Referencia Mundial (IUSS Working Group, 2015).

La descripción de los perfiles se realizó utilizando pozos pedológicos de 1.5 m de profundidad o hasta llegar al material parental (Bautista et al., 2011). En campo se determinó la estructura, color, densidad de raíces y volumen de fragmentos de roca (FAO, 2009). En laboratorio se midieron la materia orgánica (Nelson and Sommers, 1982), capacidad de intercambio catiónico (Rhoades, 1982), porcentajes de arena, limo y arcilla (Day, 1965), conductividad eléctrica y pH (SEMARNAT, 2002).

La validación del mapa geopedológico se realizó mediante árboles de clasificación utilizando el software Weka 3.8.4 y el algoritmo J48 (Frank et al., 2016). Las variables

predictoras del modelo fueron los elementos del paisaje geopedológico y los grupos taxonómicos la variable a predecir. El modelo se entrenó con la opción de prueba Cross-Validation utilizando 10 pliegues.

Además, se realizó una regionalización de ambientes morfogenéticos a partir de los paisajes geopedológicos, topoformas (INEGI 2001) y elevaciones digitales (INEGI, 2012) utilizando la clasificación propuesta por Zinck (2012) (Figura 8).

Los ambientes morfogenéticos son medios biofísicos que se originan y controlan a partir de una geodinámica interna particular. Estos ambientes pueden clasificarse en seis taxa: 1) estructural, en el cual la geodinámica interna funciona a través de la tectónica y/o del vulcanismo; 2) deposicional, conformado por la deposición de materiales; 3) erosional o denudacional, controlado por procesos de disección y remoción de materiales transportados; 4) disolucional, constituido por procesos de disolución de rocas; 5) residual, caracterizado por relieve aislado (inselberg); y 6) mixto (Zinck, 2012).

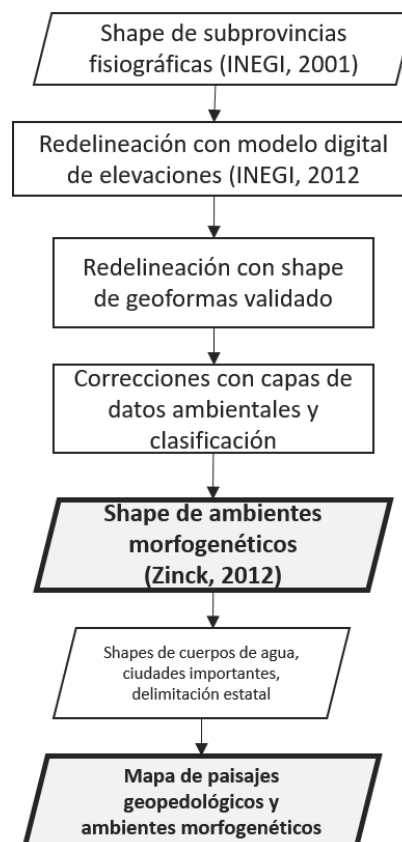


Figura 8. Proceso para la generación del mapa de ambientes morfogenéticos

Cuadro 1. Factores formadores de los suelos del estado de Michoacán

Geoformas	Tipos de rocas		Clima	Isobioclimas	LPC	Vegetación y uso de suelo	Grupos de suelos
Montañas	Andesita	Extrusiva	Aw0(w)	A_Pluvial D_Supratropical H_Hiperhúmedo	3 meses	Agricultura de humedad anual	Alisol
Lomeríos	Andesita-Basalto	Extrusiva	Aw1(w)	A_Pluvial D_Supratropical G_Húmedo	4 meses	Agricultura de humedad anual y semipermanente	Andosol
Piedemontes	Andesita-Brecha volcánica	Extrusiva	(A)C(w0)(w)	B_Pluviestacional A_Infratropical G_Húmedo	5 meses	Agricultura de riego anual	Anthrosol
Planicies acolinadas	Andesita-Dacita	Extrusiva	A(C)w1(w)	B_Pluviestacional A_Infratropical F_Subhúmedo	5-6 meses	Agricultura de riego anual y permanente	Arenosol
Planicies onduladas	Basalto	Extrusiva	(A)C(w2)(w)	B_Pluviestacional B_Termotropical G_Húmedo		Agricultura de riego anual y semipermanente	Calcisol
Planicies subhorizontales	Dacita-Riolita	Extrusiva	BS0(h')w(w)	B_Pluviestacional B_Termotropical F_Subhúmedo		Agricultura de riego permanente	Cambisol
Valles	Igimbrita-Riolita	Extrusiva	BS1(h')w(w)	B_Pluviestacional C_Mesotropical G_Húmedo		Agricultura de riego semipermanente	Fluvisol
	Lahar	Extrusiva	C(w1)(w)	B_Pluviestacional C_Mesotropical F_Subhúmedo		Agricultura de riego semipermanente y permanente	Gleysol
	Diorita	Intrusiva	C(w2)(w)	B_Pluviestacional D_Supratropical H_Hiperhúmedo		Agricultura de temporal anual	Histosol
	Granito	Intrusiva		B_Pluviestacional D_Supratropical G_Húmedo		Agricultura de temporal anual y permanente	Kastanozem
	Granito-Granodiorita	Intrusiva		C_Xérico A_Infratropical E_Seco		Agricultura de temporal anual y semipermanente	Leptosol
	Esquisto-Filita	Metamórfica		C_Xérico B_Termotropical E_Seco		Agricultura de temporal permanente	Luvisol
	Meta-arenisca-Filita	Metamórfica		C_Xérico C_Mesotropical E_Seco		Bosque de encino	Phaeozem
	Aluvial	Sedimentaria		C_Xérico A_Infratropical D_Semiárido		Bosque de encino-pino	Regosol
	Arenisca-Caliza	Sedimentaria				Bosque de pino	Solonchak
	Arenisca-Lutita	Sedimentaria				Bosque de pino-encino	Stagnosol

Conglomerado monogénico-Arenisca	Sedimentaria
Conglomerado poligénico-Caliza	Sedimentaria
Lacustre	Sedimentaria
Lutita-Caliza	Sedimentaria

Bosque mesófilo de montaña	Technosol
Matorral crasicaule	Umbrisol
Palmar inducido	Vertisol
Pastizal cultivado	
Pastizal inducido	
Selva baja caducifolia	
Selva mediana subcaducifolia	
Tular	
Urbano construido	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subcaducifolia	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	
Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia	

4.2.3 Mapas de las funciones ambientales de los suelos

La parte digital de la metodología híbrida se abordó a través de la aplicación de técnicas de aprendizaje automático y análisis de imágenes de perfiles de suelos para la estimación de propiedades necesarias para la evaluación de las funciones ambientales y que no siempre se registran en las bases de datos de suelos (Figura 9).

Para el entrenamiento de una función de pedotransferencia que permitiera la estimación de la densidad aparente de los suelos (DA) se utilizó la base de datos del muestreo de perfiles de suelos y el algoritmo de aprendizaje supervisado de árboles aleatorios del software Weka 3.8.4. El modelo fue entrenado con la opción de prueba use training set, utilizando 123 datos de horizontes de suelos.

Los árboles aleatorios son una herramienta eficaz de predicción, ya que se basan en el ensamble de árboles de clasificación y regresión mediante niveles de aleatorización (Breiman, 2001). Las variables predictoras de la DA se seleccionaron con base en conocimiento experto, se utilizó la clase textural, porcentajes de arena, limo y arcilla, estructura, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, alófono y valor de pH para el entrenamiento del modelo. La función de pedotransferencia se aplicó a los datos de perfiles de suelos de la serie II del INEGI (2014).

Por otro lado, el método propuesto para el análisis de imágenes de perfiles de suelos para la delineación de horizontes y cuantificación del volumen de fragmentos de roca (FG) puede consultarse en el capítulo II de esta tesis. Para evaluar las funciones ambientales de los suelos se calibraron los modelos de evaluación del software S&E con la finalidad de adaptarlos a las condiciones particulares de los suelos de zonas volcánicas (capítulo III).

Las funciones ambientales que se evaluaron fueron: hábitat humano, naturalidad, archivo histórico, descomposición de compuestos orgánicos, recarga de acuíferos (calidad y cantidad de agua de recarga), retención de nutrimentos, sorción de metales pesados, calidad agrícola y contenido de carbono orgánico. En total se determinaron las aptitudes de 191 perfiles de suelos. Los resultados de las evaluaciones se georreferenciaron y se generalizaron por paisaje geopedológico. La generalización se realizó considerando la

aptitud dominante dentro del paisaje pedológico y en el caso de tener dos o más aptitudes dominantes se utilizó la peor evaluación.

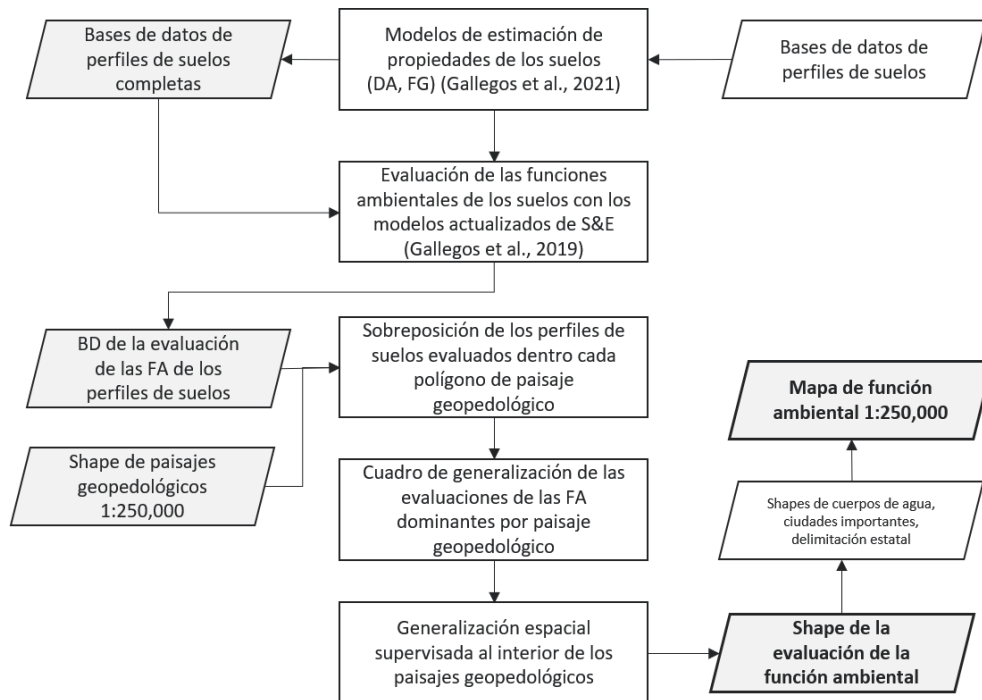


Figura 9. Proceso para la generación de los mapas de las funciones ambientales

La evaluación del contenido de carbono orgánico de los suelos (COS) se efectuó con un nuevo método en el que se utilizaron los valores de COS de la evaluación edafo-ecológica obtenida con el software S&E. El COS en $t\ ha^{-1}$ de los paisajes geopedológicos se calculó considerando la asociación de los grupos de suelos dominantes dentro de cada paisaje geopedológico, similar a lo que proponen Aguilar y Bautista (2011). Para realizar el cálculo se asignó un peso porcentual al contenido de COS de cada grupo de suelos de acuerdo con su dominio en la asociación, de la siguiente manera:

$$COS_{pg} = COS_{GS1} \quad 1)$$

$$COS_{pg} = (COS_{GS1} * 0.6) + (COS_{GS2} * 0.4) \quad 2)$$

$$COS_{pg} = (COS_{GS1} * 0.5) + (COS_{GS2} * 0.3) + (COS_{GS3} * 0.2) \quad 3)$$

Dónde: COS_{pg} se refiere al contenido de COS por asociación de suelos dentro del paisaje geopedológico; y COS_{GS} es el contenido de COS por grupo de suelo.

Las clases de aptitud de COS_{pg} se determinaron mediante intervalos de evaluación generados a partir de los valores máximos y mínimos de COS_{pg} , sin considerar los valores extremos. Los intervalos se realizaron seccionando los datos en cinco subconjuntos que representan la aptitud de los suelos para el almacenamiento del COS, los cuales fueron: a) muy alta ($>1,000 \text{ t ha}^{-1}$); b) alta ($>684 \text{ a } \leq 1000 \text{ t ha}^{-1}$); c) intermedia ($>367 \text{ a } \leq 684 \text{ t ha}^{-1}$); d) baja ($> 50 \text{ a } \leq 367$); y e) muy baja ($\leq 50 \text{ t ha}^{-1}$).

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Mapa geopedológico

Los paisajes geomorfológicos fueron la base del mapa de suelos de Michoacán, en el área de estudio se identificaron montañas (68.81%), lomeríos (6.31%), piedemontes (7.47%), valles (5.44%), planicies acolinadas (6.31%), planicies subhorizontales (0.74%) y planicies onduladas (0.06%).

El modelo de geformas original, presentado por Bocco et al., (2001) (MB), ubica sierras, lomeríos altos y bajos, y planicies al sur del estado. En el trabajo de Mendoza (2019) se reclasifican como montañas las sierras del sur del modelo MB. En este estudio se identificaron para esta zona montañas, lomeríos, planicies acolinadas, onduladas y subhorizontales.

Para el centro del estado se encontraron principalmente valles y piedemontes, estos no fueron reclasificados dado que la metodología semiautomatizada de Priego et al. (2010) no permitió su identificación. En el norte del estado los lomeríos altos y bajos del MB se reclasificaron como montañas, ya que presentaron una altura relativa mayor a 101 m km^{-2} .

Con respecto a los ambientes morfogenéticos, la mayor parte del estado correspondió a un ambiente volcánico estructural (28.53%) en el cual dominan los Andosols; seguido de un ambiente mixto estructural deposicional (24.75%) en el que dominan los Vertisols en las partes bajas y los Cambisols y Leptosols en las partes altas (Cuadro 2).

Existen otras regionalizaciones para el área de estudio que consideran diferentes componentes del medio natural para su delimitación. El INEGI (2001) propone una

regionalización con seis subprovincias fisiográficas definidas a partir de aspectos geológicos y topográficos del área. Antaramián y Correa (2003) e Ihl (2019) presentan una regionalización de cinco zonas delimitadas con base en el relieve y topoformas. En este estudio se delimitaron seis ambientes morfogenéticos con base en aspectos fisiográficos, geoformas y elevaciones del terreno. Las correspondencias entre estas propuestas de regionalización se presentan en el cuadro 3.

Por otro lado, el mapa de la distribución espacial de los suelos del estado de Michoacán, compilado a escala 1:250,000, mostró que los grupos de suelos que ocupan la mayor parte del territorio son los Andosols (28.04%), Leptosols (21.52%), Vertisols (14.11%) y Luvisols (13.22%). Dentro de los principales grupos de suelos se encontraron asociaciones de Phaeozems, Gleysols, Umbrisols y Alisols (Mapa 1). El 1.18% del estado no contó con información de la distribución de los suelos.

Existen otros mapas y capas de datos que representan la distribución de los suelos de Michoacán. La capa de datos propuesta por el INIFAP y CONABIO (2001) (IC) ubica en las planicies costeras del sur principalmente Regosols y Phaeozems. Los Phaeozems no son coherentes con los factores formadores encontrados en esta área, ya que este tipo de suelos se desarrollan típicamente en praderas o bosques. Ejemplos de tipos de suelos comunes para las áreas costeras pueden ser los Arenosols o Fluvisols (IUSS Working Group, 2015).

En los paisajes geopedológicos de montaña del ambiente I, la IC ubica Luvisols, Acrisols, Phaeozem, Cambisols y Leptosols. Los datos recopilados de perfiles de suelos para este estudio no evidenciaron la presencia de Acrisols, en general se encontraron suelos con arcillas de alta actividad. Los suelos desarrollados en los ambientes II y III, de acuerdo con la IC, se asemejan a los encontrados en este estudio, ya que en ambos modelos de distribución dominan los Vertisols en el ambiente I y Regosols en el ambiente III. Para el ambiente IV, la IC muestra una variedad de suelos, entre los que se incluyen Regosols, Luvisols, Andosols, Leptosols, Acrisols, entre otros.

Cuadro 2. Descripción de los paisajes geomorfológicos por ambientes morfogenéticos del estado de Michoacán

Ambiente morfogenético	Paisajes geopedológicos
I Mixto estructural-deposicional	<p>Montañas terrígenas-carbonatadas, metamórficas e intrusivas en isobioclima C_Xérico A_Infratropical y B_Termotropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia. Densidad de volcanes nula, desarrolladas en Leptosols, Cambisols y Regosols.</p> <p>Lomeríos terrígenos e intrusivos en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Pastizal cultivado y vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, densidad de volcanes nula, desarrollados en Regosols.</p> <p>Planicies acolinadas aluviales en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso de suelo agrícola, densidad de volcanes nula, desarrolladas en Arenosols y Gleysols.</p> <p>Planicies onduladas terrígenas en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso de suelo urbano y agrícola, densidad de volcanes nula, sin información de los grupos de suelos.</p> <p>Planicies subhorizontales terrígenas aluviales en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso de suelo agrícola y vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, densidad de volcanes nula, sin información de los grupos de suelos.</p> <p>Valles terrígenos-aluviales en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia y pastizal, densidad de volcanes nula, desarrollados en Vertisols.</p>
II Mixto tectónico estructural-deposicional	<p>Montañas tecto-volcánicas en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco y D_semiárido con una LPC de 3-4 meses. Vegetación secundaria arbustiva y arbórea de selva baja caducifolia y uso agrícola, densidad de volcanes muy baja, desarrolladas en Leptosols y Regosols.</p> <p>Piedemontes tecto-volcánicos y aluviales en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco y D_semiárido con una LPC de 3-4 meses. Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia y uso agrícola, densidad de volcanes muy baja, desarrollados en Vertisols y Cambisols.</p> <p>Valles aluviales, tecto-volcánicos e intrusivos en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco y D_semiárido con una LPC de 3-4 meses. Vegetación secundaria arbustiva y arbórea de selva baja caducifolia y uso agrícola, densidad de volcanes nula. Valles aluviales desarrollados en Vertisols, los demás sin información de grupos de suelos.</p>
III Estructural	<p>Montañas constituidas de rocas volcánicas y terrígenas en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Vegetación secundaria arbustiva y arbórea de selva baja caducifolia y pastizal inducido, densidad de volcanes muy baja, desarrolladas en Leptosols, Regosols y Cambisols.</p> <p>Valles terrígenos en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso de suelo agrícola y vegetación de selva baja caducifolia, densidad de volcanes nula, desarrollados en Cambisols, Regosols y Leptosols.</p>

- IV Estructural volcánico transicional
- Montañas volcánicas y terrígenas en isobioclimas C_Xérico A_Infratropical y B_Termotropical E_Seco con una LPC de 3-4 meses; vegetación secundaria arbórea y arbustiva de selva baja caducifolia, densidad de volcanes muy baja; desarrolladas en Regosols, Luvisols, Cambisols y Leptosols. Montañas intrusivas en isobioclimas C_Xérico A_Infratropical E_Seco a B_Pluviestacional B_Termotropical F_Subhúmedo, con una LPC de 4-5 meses; vegetación secundaria arbórea y arbustiva de selva baja caducifolia, bosque de encino y uso agrícola, densidad de volcanes muy baja; desarrolladas en Luvisols, Phaeozems y Regosols.
- Lomeríos volcánicos en isobioclimas C_Xérico A_Infratropical E_Seco a B_Pluviestacional B_Termotropical F_Subhúmedo, con una LPC de 4-5 meses. Uso agrícola y vegetación secundaria arbórea de bosque de pino, densidad de volcanes muy baja, sin información de los grupos de suelos.
- Piedemontes volcánicos en isobioclimas C_Xérico A_Infratropical E_Seco a B_Pluviestacional B_Termotropical F_Subhúmedo, con una LPC de 4-5 meses. Uso agrícola, densidad de volcanes muy baja, desarrollados en Andosols y Vertisols.
- Valles volcánicos, terrígenos e intrusivos en isobioclima C_Xérico A_Infratropical E_Seco y D_Semiárido con una LPC de 3-4 meses. Uso agrícola y vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, densidad de volcanes nula. Los valles terrígenos desarrollados en Vertisols.
- V Estructural volcánico
- Montañas volcánicas en isobioclima B_Pluviestacional C_Mesotropical y D_Supratropical G_Húmedo con una LPC de 5-6 meses. Vegetación de bosque de pino-encino y uso agrícola, densidad de volcanes muy alta, desarrolladas en Andosols, Luvisols y Phaeozems.
- Lomeríos volcánicos en isobioclima B_Pluviestacional C_Mesotropical G_Húmedo y F_Subhúmedo con una LPC de 5-6 meses. Uso agrícola y vegetación de bosque de pino-encino, densidad de volcanes muy baja, desarrollados en Andosols, Luvisols y Phaeozems.
- Piedemontes volcánicos en isobioclima B_Pluviestacional C_Mesotropical G_Húmedo y F_Subhúmedo con una LPC de 5-6 meses. Uso agrícola y vegetación secundaria arbustiva y arbórea de bosque de pino-encino y encino, densidad de volcanes muy baja, desarrollados en Andosols, Cambisols y Luvisols.
- Planicies acolinadas volcánicas y aluviales-lacustres en isobioclima B_Pluviestacional C_Mesotropical F_Subhúmedo con una LPC de 5 meses. Uso agrícola, densidad de volcanes nula, desarrolladas en Vertisols y Phaeozems.
- Planicies subhorizontales volcánicas en isobioclima B_Pluviestacional C_Mesotropical G_Húmedo y F_Subhúmedo con una LPC de 5-6 meses. Uso agrícola, densidad de volcanes nula, desarrolladas en Cambisols y Umbrisols.
- VI Mixto volcánico estructural-deposicional
- Montañas volcánicas en isobioclima C_Xérico B_Termotropical y C_Mesotropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso agrícola y vegetación secundaria arbustiva y arbórea de selva baja caducifolia, densidad de volcanes muy baja, desarrolladas en Cambisols y Andosols.
- Lomeríos volcánicos en isobioclima C_Xérico B_Termotropical y C_Mesotropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso agrícola y vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, densidad de volcanes muy baja, desarrollados en Vertisols y Phaeozems.
- Planicies acolinadas volcánicas y aluviales-lacustres en isobioclima C_Xérico B_Termotropical y C_Mesotropical E_Seco con una LPC de 4 meses. Uso agrícola, densidad de volcanes nula, desarrolladas en Vertisols y Fluvisols.

En el modelo de distribución de suelos propuesto en este estudio se identificaron Luvisols, Andosols y Regosols en el ambiente IV. Ambas propuestas coincidieron en que los suelos dominantes de los ambientes V y VI son Andosols y Vertisols respectivamente, sin embargo, la IC identifica un área importante de Vertisols en el ambiente V, lo cual no coincide con el patrón de distribución encontrado en este estudio, en el cual los Vertisols se ubicaron en zonas bajas del relieve conformadas por materiales terrígenos, aluviales y en menor medida volcánicos.

En general, si se requiere utilizar la IC se recomienda una actualización de los grupos de suelos utilizando la WRB (2015), ya que en esta capa de datos se pueden encontrar tipos de suelos, como los Litosol, Ranker y Rendzina, que ya no se identifican en la última versión de la base de referencia mundial. Además, se recomienda comprobar la congruencia entre los factores de formación y suelos de la zona que se estudia.

Cuadro 3. Correspondencias entre propuestas de regionalización para el estado de Michoacán

INEGI (2001)	Antaramián y Correa (2003) IHI (2019)	Ambientes morfogénicos de este trabajo
Costas del sur Sierras de la costa de Jalisco y Colima Cordillera costera del sur	Llanura costera Sierra Madre del Sur	Ambiente I: mixto estructural-deposicional
Depresión de Tepalcatepec	Depresión del Balsas-Tepalcatepec	Ambiente II: mixto tectónico estructural-deposicional
Depresión del Balsas		Ambiente III: estructural
Escarpa limítrofe del sur	Sistema Volcánico Transversal	Ambiente IV: estructural volcánico transicional
Neovolcánica tarasca Llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo Mil cumbres		Ambiente V: estructural volcánico
Bajío Guanajuatense Chapala Sierras y bajíos michoacanos	Altiplanicie	Ambiente VI: volcánico estructural-deposicional

El mapa de distribución de los suelos de Michoacán de Bedolla et al. (2019) ubica en las planicies costeras una asociación de Cambisols, Regosols y Phaeozems. Los Phaeozems no son coherentes con los factores de formación encontrados en esta zona, ya que este tipo de suelos típicamente se desarrolla en climas cálidos a fríos moderadamente continentales con vegetación de praderas o bosques (IUSS Working Group, 2015). En contraste, en esas zonas domina un isobioclima xérico infratropical seco con vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia y usos agrícolas.

En el mapa de Bedolla et al. (2019) la zona montañosa del sur se conforma por Leptosols y Luvisols. Los Leptosols coinciden con los suelos mostrados en el mapa generado en este estudio, sin embargo, los Luvisols de esta zona se reclasificaron como Alisols debido a que los perfiles de suelos presentaron una baja saturación de bases (<50%). Ambos modelos coincidieron en los grupos de suelos dominantes de los ambientes II, V y VI.

Por otro lado, Bedolla et al., (2019) organiza los suelos del estado en tipo zonal, intrazonal y azonal, ubicando los Andosols en el grupo zonal. Si bien este grupo de suelos se encuentra en las áreas de clima templado del estado, las geoformas y el material parental podrían ser considerados como sus factores de formación dominantes dado que se desarrollan a partir del intemperismo de ceniza volcánica en relieves ondulados a montañosos, por lo que podrían ser clasificados como intrazonales.

La validación del mapa geopedológico de este estudio dio como resultado un árbol de decisión con 217 hojas, con un índice Kappa de 0.98%. Este árbol de decisión consideró a los ambientes morfogenéticos, tipos de roca, isobioclimas, cubierta vegetal y geoformas como las variables predictoras de los grupos de suelos, estableciendo así una función de pedotransferencia que representa la relación entre los suelos y los atributos de los paisajes geopedológicos.

4.3.2 Mapas de las funciones ambientales de los suelos

Se generaron diez mapas de las funciones ambientales de los suelos del área de estudio a escala 1:250,000 utilizando una metodología híbrida que integró el enfoque geopedológico y técnicas de mapeo digital de suelos para la inferencia y validación de la información pedológica.

El modelo de árboles aleatorios generado para la estimación de la densidad aparente dio como resultado un coeficiente de correlación de 0.98. El orden de importancia de las variables predictoras del modelo, con base en la disminución promedio de impurezas, fue: 1) clase textural; 2) tipo de estructura; 3) media geométrica del porcentaje de arena, limo y arcilla; 4) pH; 5) materia orgánica; 6) capacidad de intercambio catiónico; y 7) contenido de alófono. Los resultados del análisis de imágenes de perfiles de suelos para la delineación de horizontes y cuantificación del volumen de fragmentos de roca pueden consultarse en el capítulo II de esta tesis.

La función de hábitat humano presentó principalmente aptitudes bajas (46.55%) y muy bajas (43.90%) (Mapa 2), estas aptitudes se asocian a los paisajes geopedológicos de montaña con pendientes pronunciadas ($\geq 15\%$) y a los Andosols, que presentan una estabilidad de agregados típicamente baja. Las áreas con aptitudes altas (0.60%) y muy altas (0.33%) fueron escasas, se ubicaron en planicies y valles de los ambientes morfogenéticos II y V. Los lomeríos conformados por Vertisols presentaron aptitudes intermedias, y aquellos en los que dominan los Andosols aptitudes bajas. Las zonas sin información (4.74%) corresponden principalmente a valles ubicados en los ambientes I y II.

La evaluación de hábitat humano consideró la inclinación de la pendiente, presencia de contaminantes en el sitio, humedad del ambiente y la generación de polvo (Bautista et al., 2016). Adicionalmente, se realizó una comprobación de los tipos de suelos en los paisajes geopedológicos de montañas, de tal manera que si son Leptosols el riesgo de deslaves o movimientos en masa disminuye, ya que estos son suelos someros (≤ 25 cm) desarrollados sobre roca continua o material duro técnico (IUSS Working Group, 2015). La evaluación de esta función ambiental podría complementarse considerando los riesgos volcánicos, ya que para el estado de Michoacán se reportan 424 aparatos volcánicos, de los cuales, el Parícutín se encuentra en estado activo (INEGI, 2002).

La evaluación de la naturalidad del suelo fue principalmente intermedia (63%), asociada a los tipos de cubierta vegetal y uso de suelo que existen en el área de estudio (Gallegos et al., 2019). La aptitud intermedia se presentó en los paisajes geopedológicos de montaña conformados por diversos grupos de suelos, tales como Andosols, Cambisols y

Leptosols, dentro de los ambientes morfogenéticos I, III y IV. Le siguió una aptitud muy baja (29.46%) en los piedemontes, planicies, valles y algunos lomeríos con uso agrícola, y en el ambiente II (Mapa 3). Los paisajes geopedológicos que presentaron una aptitud muy alta corresponden al 0.79% del territorio del estado, estos paisajes están conformados por montañas con suelos que poseen horizontes A gruesos, con un espesor mayor a 30 cm.

La evaluación de la naturalidad del suelo evaluó el tipo de uso, cubierta vegetal y espesor del horizonte A de los perfiles de suelos (Gallegos et al., 2019). Además, se realizó una comprobación considerando que si el perfil de suelo a) tiene un horizonte superficial con sufijo 'p' que denota labranza u otra acción humana (FAO, 2009); b) uso de suelo agrícola, pecuario, con asentamientos urbanos o industrial; o c) fue clasificado como Technosol o Anthrosol, la evaluación de su naturalidad fue calificada como muy baja.

El 65.46% del territorio del estado fue evaluado con aptitudes muy bajas para la función de archivo natural (Mapa 4). Únicamente el ambiente V presentó evaluaciones muy altas debido a que en esta zona dominan los Andosols, los cuales preservan información histórica de las erupciones volcánicas ocurridas en el pasado (Kleber y Jahn, 2007). Para la función de archivo cultural se georreferenciaron las ubicaciones arqueológicas del estado.

La evaluación de la función ambiental de archivo histórico se complementó mediante la comprobación del sufijo 'b' en la denominación del horizonte, ya que denota la presencia de horizontes enterrados (FAO, 2009), en estos casos el perfil de suelo se evaluó con una aptitud muy alta para esta función ambiental. En este sentido, existe poca información en el estado que permita una evaluación más precisa de la función de archivo histórico.

La descomposición de compuestos orgánicos presentó mayormente aptitudes muy bajas (47.61%) y bajas (15.05%) (Mapa 5), esto se debe a que los suelos poseen bajos porcentajes de materia orgánica o un tipo de estructura que no favorece la actividad de los organismos del suelo (Bautista et al., 2016). En el ambiente I, por ejemplo, dominaron los Cambisols, Leptosols y Regosols, los cuales son suelos jóvenes que presentan poca acumulación de materia orgánica, y en el ambiente II, además de suelos jóvenes, encontramos Vertisols en las zonas bajas del relieve, los cuales típicamente poseen

estructuras gruesas, con alta estabilidad y en forma de cuña o prismática (IUSS Working Group, 2015).

En el trabajo presentado en el capítulo III se propusieron calibraciones para la evaluación de la descomposición de compuestos orgánicos. Sin embargo, esta evaluación podría complementarse considerando también la calidad del recurso con respecto a su relación C/N, y el tipo de descomposición (aerobia o anaerobia) y organismos asociados por grupo de suelo (Bautista et al., 2008; Schowalter, 2016).

La evaluación de la función de recarga de acuíferos se dividió en dos partes: calidad y cantidad de agua de recarga. La calidad de agua de recarga fue evaluada con aptitudes intermedias para el 48.81% del territorio del estado, que corresponde principalmente a los ambientes IV, V y VI (Mapa 6). Estos ambientes poseen aptitudes intermedias ya que se conforman de suelos con altas capacidades de intercambio catiónico (640-955 cmol kg^{-1}), como los Vertisols, y de intermedias a altas capacidades de campo (310-600 L m^{-2}), como los Andosols. Los ambientes I, II y III presentaron suelos jóvenes, con capacidades de intercambio catiónico y de campo más bajas, o muy someros, como los Leptosols.

La cantidad de agua de recarga fue evaluada con buenas aptitudes para la mayor parte del estado, el 41.40% del territorio posee una aptitud alta, y el 31.38% una aptitud intermedia (Mapa 7). Las aptitudes bajas (18.90%) y muy bajas (2.20%) se presentaron en los ambientes II y VI, asociadas a los Vertisols de los piedemontes y planicies, y en el ambiente III a los paisajes geopedológicos de montañas y valles conformados por Regosols y Cambisols. Los Vertisols se evaluaron con bajas aptitudes ya que se caracterizan por poseer un horizonte vértico con más de 30% de arcilla (IUSS Working Group, 2015), lo cual dificulta la infiltración de agua de lluvia a través del perfil. Por otro lado, los Regosols y Cambisols presentaron valores de conductividad hidráulica bajos (5-70 cm día^{-1}) de acuerdo con el algoritmo de evaluación.

La calibración propuesta en el capítulo III para la evaluación de la recarga de acuíferos se complementó considerando las características particulares de cada grupo de suelo encontrado en el estado. Por ejemplo, los Gleysols y Stagnosols se evaluaron con una baja capacidad de recarga debido a sus condiciones reductoras, y los Arenosols y Fluvisols

con una alta capacidad asociada a su clase textural arenosa que favorece el paso del agua a través del perfil. También, se calculó el periodo húmedo de 118 estaciones meteorológicas y se generaron nuevos intervalos de evaluación de la capacidad de campo a partir de los datos de los perfiles de suelos disponibles.

La aptitud de la función de absorción y adsorción de metales pesados fue principalmente alta (45.05%) y muy alta (25.80%) (Mapa 8). Los suelos del ambiente I, entre los que se encuentran los Arenosols, Regosols, Cambisols y Leptosols presentaron aptitudes intermedias, ya que sus valores de carbono orgánico, arcilla y pH fueron calificados con aptitudes intermedias de acuerdo con el algoritmo de evaluación (Bautista et al., 2017).

La función de retención de nutrientes fue evaluada con una aptitud intermedia para el 46.95% del territorio del estado (Mapa 9). Las áreas con aptitudes bajas (41.21%) se ubicaron mayormente en los ambientes IV y V, ya que se conforman principalmente de Andosols u otros grupos de suelos con presencia de alófono. La presencia de alófono en los suelos propicia la fijación de fósforo de forma no disponible para las plantas (Alcalá de Jesús et al., 2009), por lo que disminuyó su capacidad para efectuar esta función ambiental (Gallegos et al., 2019). Adicionalmente, se complementó este modelo de evaluación incluyendo intervalos de evaluación de los porcentajes de saturación de bases de los suelos.

La función de la calidad agrícola presentó principalmente una aptitud muy baja (68.79%) (Mapa 10), esto se debe a que es una evaluación integral que calificó el potencial de los suelos para ofrecer condiciones favorables para el crecimiento de las plantas, tales como enraizamiento adecuado, disponibilidad de nutrientes y agua disponible (Bautista et al., 2016), en este sentido, pocos suelos del estado presentaron calificaciones optimas en todos los aspectos. Los Andosols son, en general, aptos para la agricultura, sin embargo, presentan la particularidad de fijar el fósforo, lo cual restringe su productividad (Bayuelo et al., 2019).

Además de la calibración de los modelos de evaluación, propuesta en el capítulo III, se generaron nuevos intervalos de aptitud de la capacidad de aireación y capacidad de intercambio catiónico para complementar la evaluación de la calidad agrícola. Dado que esta evaluación es muy general, deben crearse y sistematizarse modelos de evaluación para

cultivos específicos del estado, como en el caso del estudio propuesto por Dubrovina y Bautista (2014), en el cual se determinaron escalas de idoneidad de suelos y climas para el cultivo del aguacate.

Por último, la evaluación del contenido de carbono orgánico de los suelos fue principalmente baja (52.69%) en el territorio del estado (Mapa 11). Las zonas con aptitudes bajas y muy bajas se ubicaron en los ambientes I, II, y III, ya que los paisajes geopedológicos que se sitúan en estos ambientes están conformados principalmente por suelos con escaso desarrollo y pobres en materia orgánica. Por otro lado, los ambientes IV, V y VI, ubicados en el Eje Neovolcánico Transmexicano, presentaron aptitudes intermedias (13.07%) y muy altas (23.26%), asociadas a la presencia de suelos ricos en carbono orgánico, como los Andosols y Phaeozems.

En este sentido, los Andosols tienen una alta capacidad de almacenamiento de carbono orgánico debido a que poseen minerales poco cristalinos derivados de la ceniza volcánica, como el alófono, que permiten la complejación, estabilización y protección física de la materia orgánica (Fiantis, 2019). En el ambiente V, por ejemplo, la asociación de Andosols, Luvisols y Phaeozems de los paisajes geopedológicos de montañas con bosques de pino-encino alcanzaron un contenido de carbono de más de 2,000 t ha⁻¹.

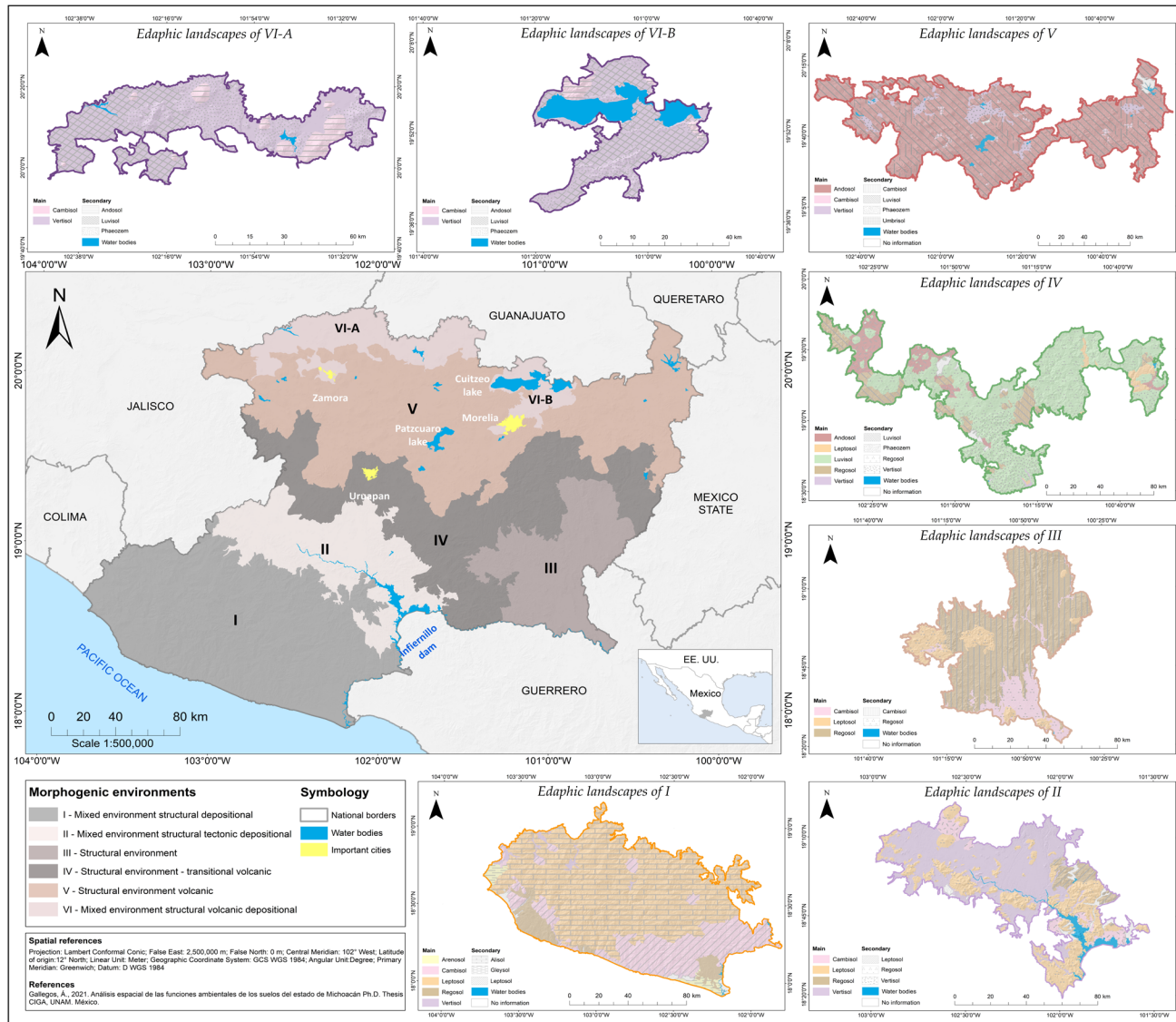
La calibración de los modelos de evaluación de las funciones ambientales de suelos de zonas volcánicas mejorará conforme se tenga más información disponible, por lo que es necesario continuar con muestreos y evaluaciones en el área de estudio, principalmente en aquellas zonas sin información.

4.4 Conclusiones del capítulo IV

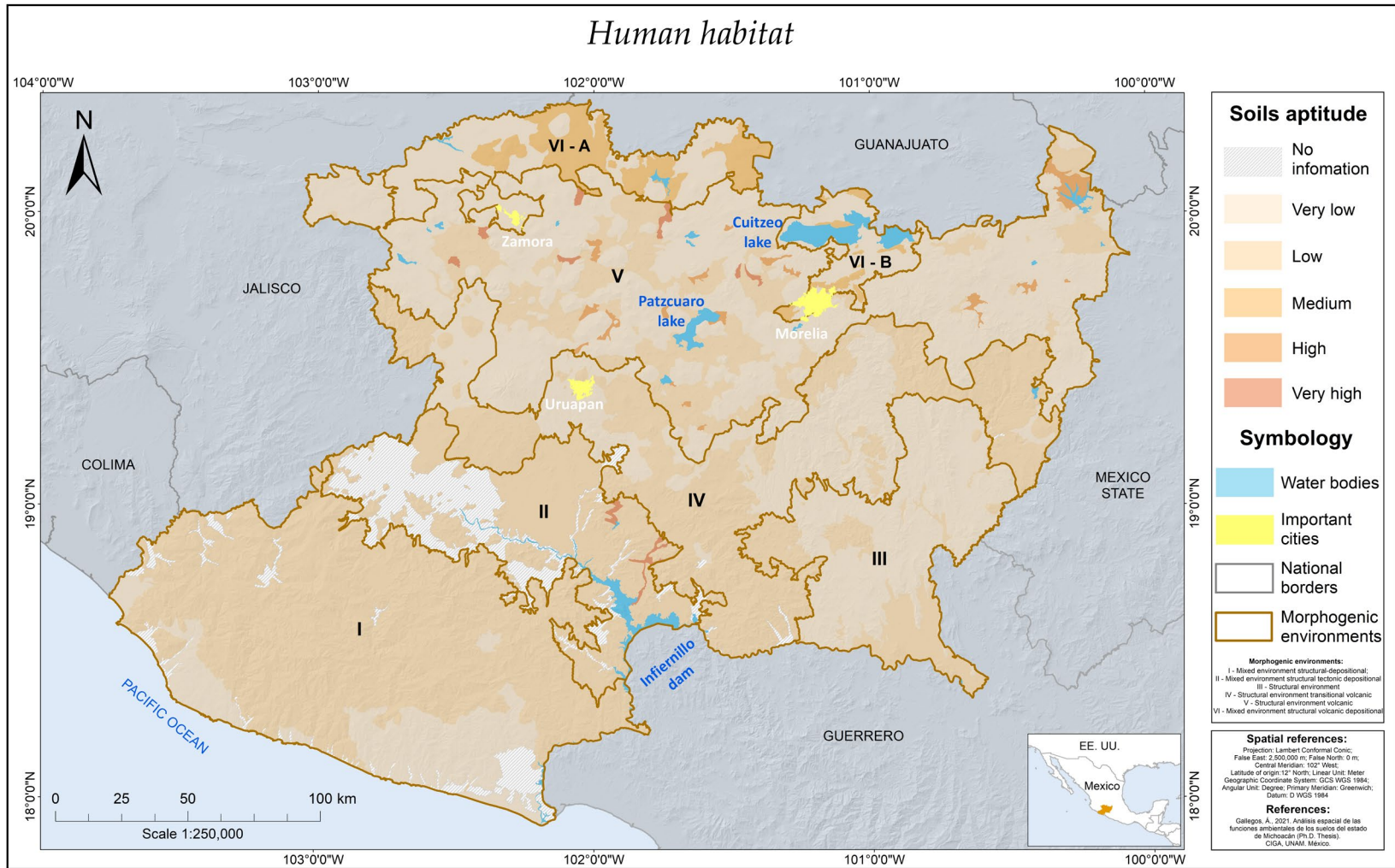
El mapa geopedológico mostró la heterogeneidad de los suelos del área de estudio como resultado de la variación de los factores formadores. Los ambientes morfogenéticos representaron estas variaciones integrándolas en diferentes regiones.

Las funciones ambientales con mejores aptitudes para Michoacán fueron la recarga de acuíferos, con respecto a la cantidad de agua de recarga y sorción de metales pesados; le siguen la retención de nutrimentos, recarga de acuíferos, referente a la calidad de agua de recarga, y descomposición de compuestos orgánicos.

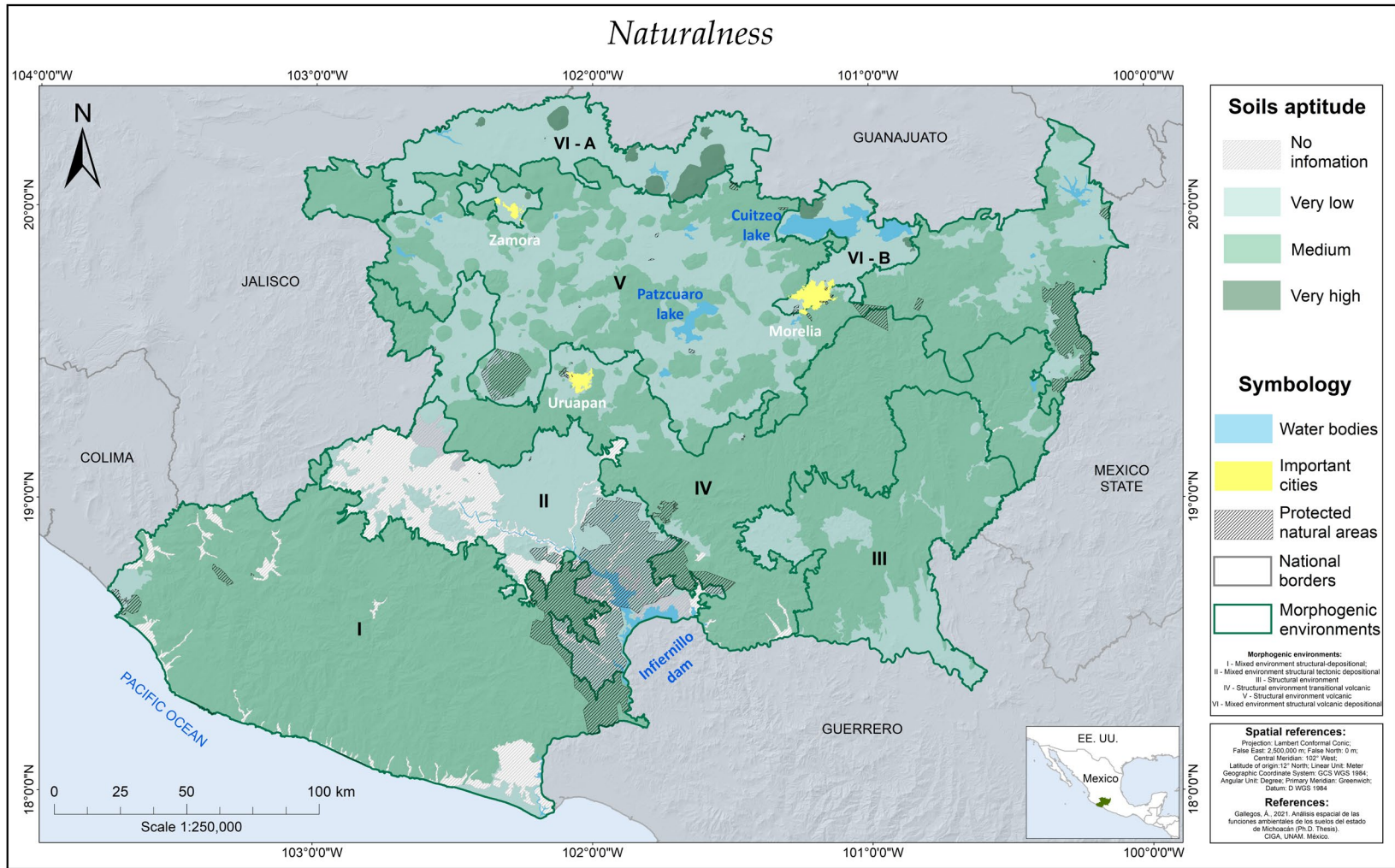
Los mapas de las funciones ambientales de los suelos de Michoacán pueden ser una herramienta útil para la toma de decisiones a gran escala sobre el manejo y planeación del uso del suelo y la toma de decisiones, ya que pueden ser utilizados por diferentes tipos de usuarios, puesto que son sencillos de interpretar.



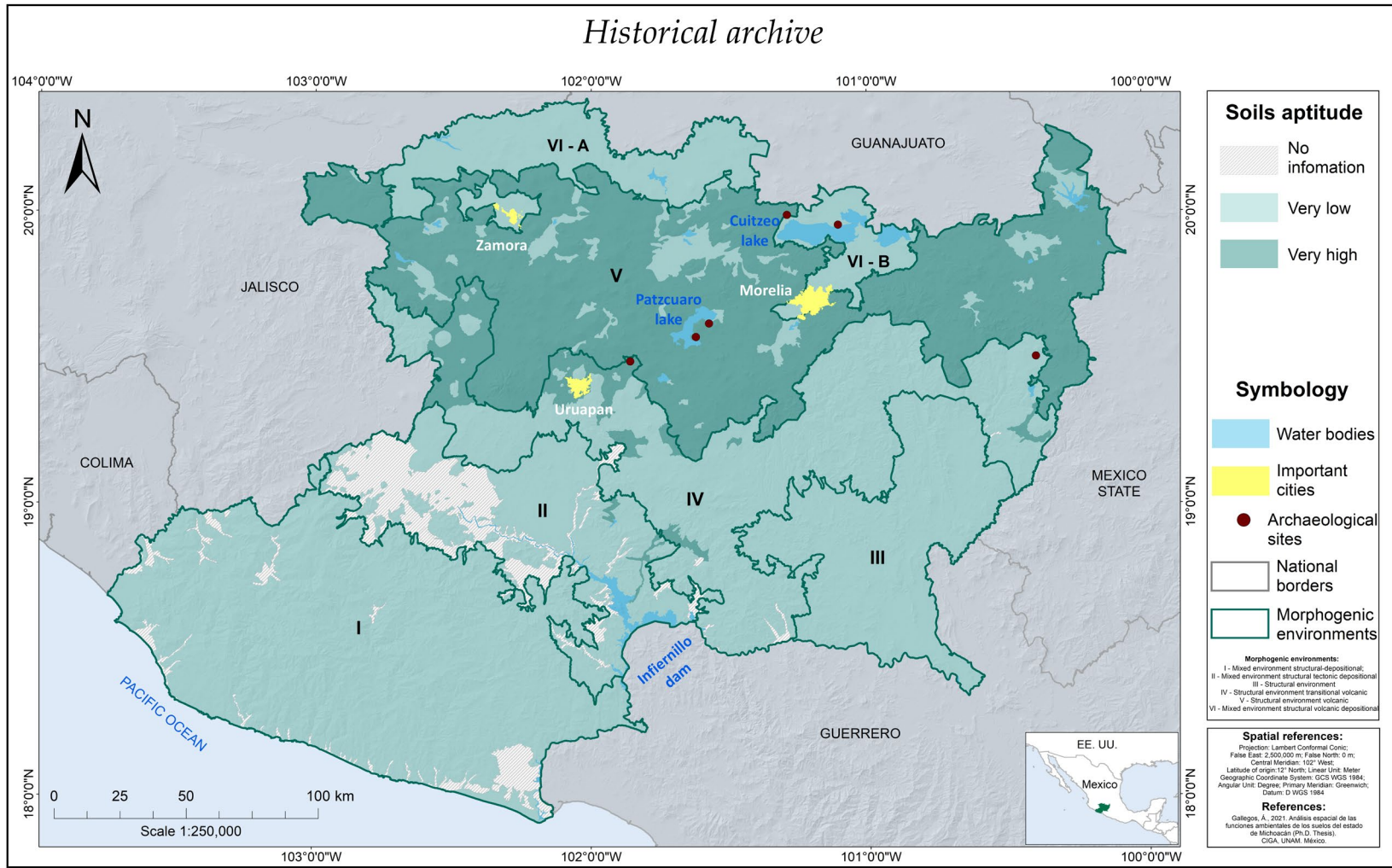
Mapa 1. Distribución de los ambientes morfogenéticos y paisajes edafológicos del estado de Michoacán, México



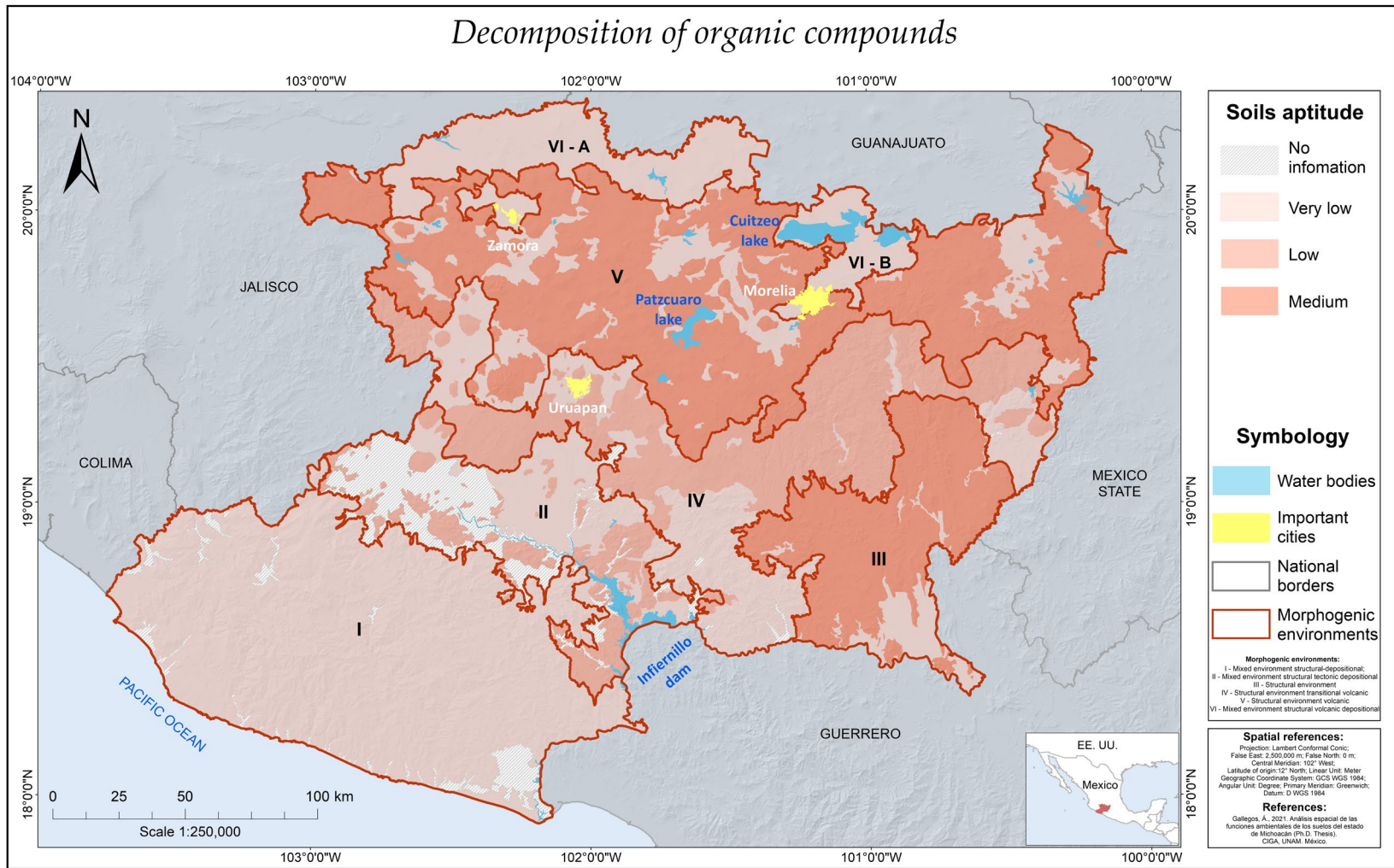
Mapa 2. Evaluación de la función de hábitat humano del estado de Michoacán, México



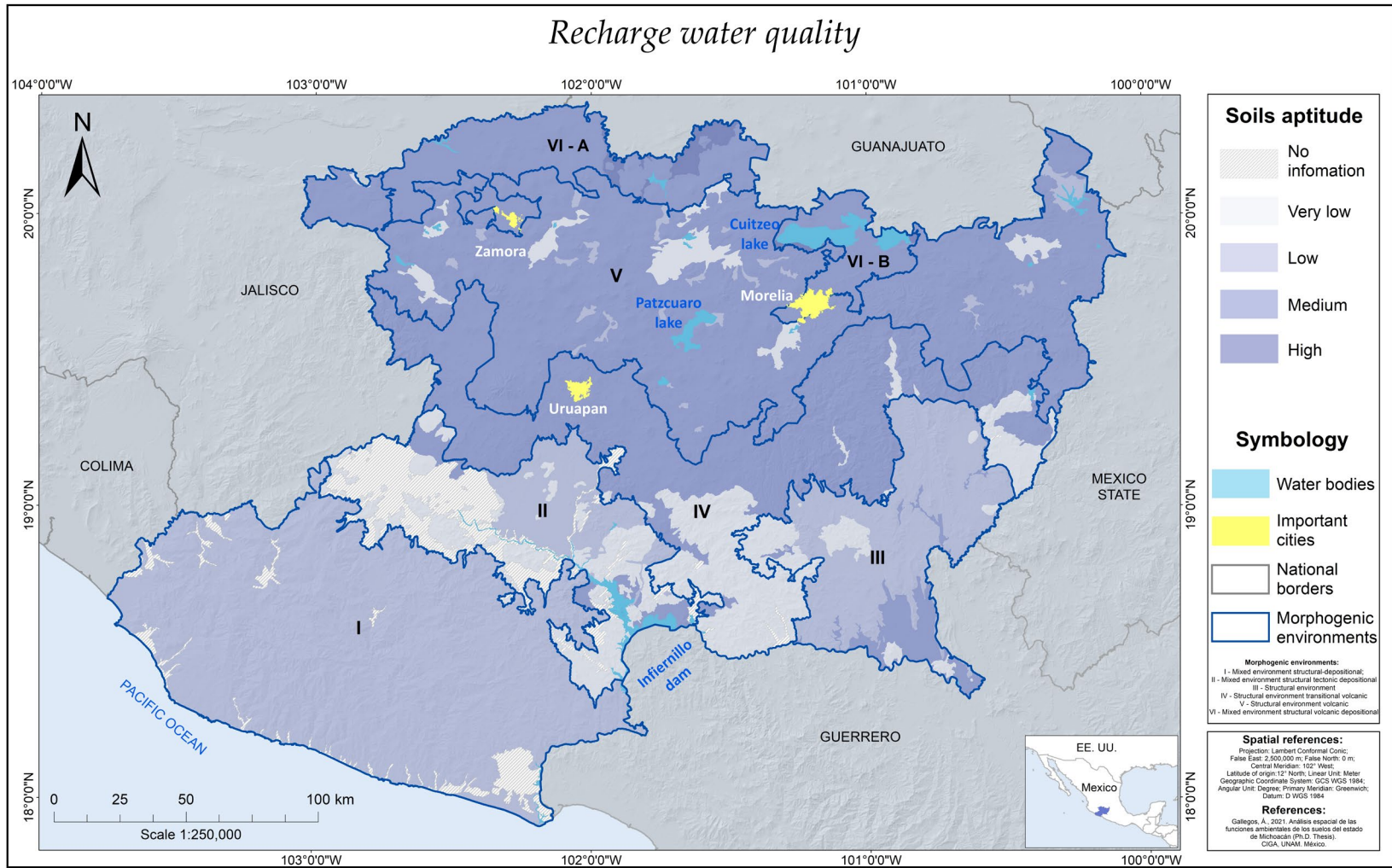
Mapa 3. Evaluación de la naturalidad de los suelos del estado de Michoacán, México



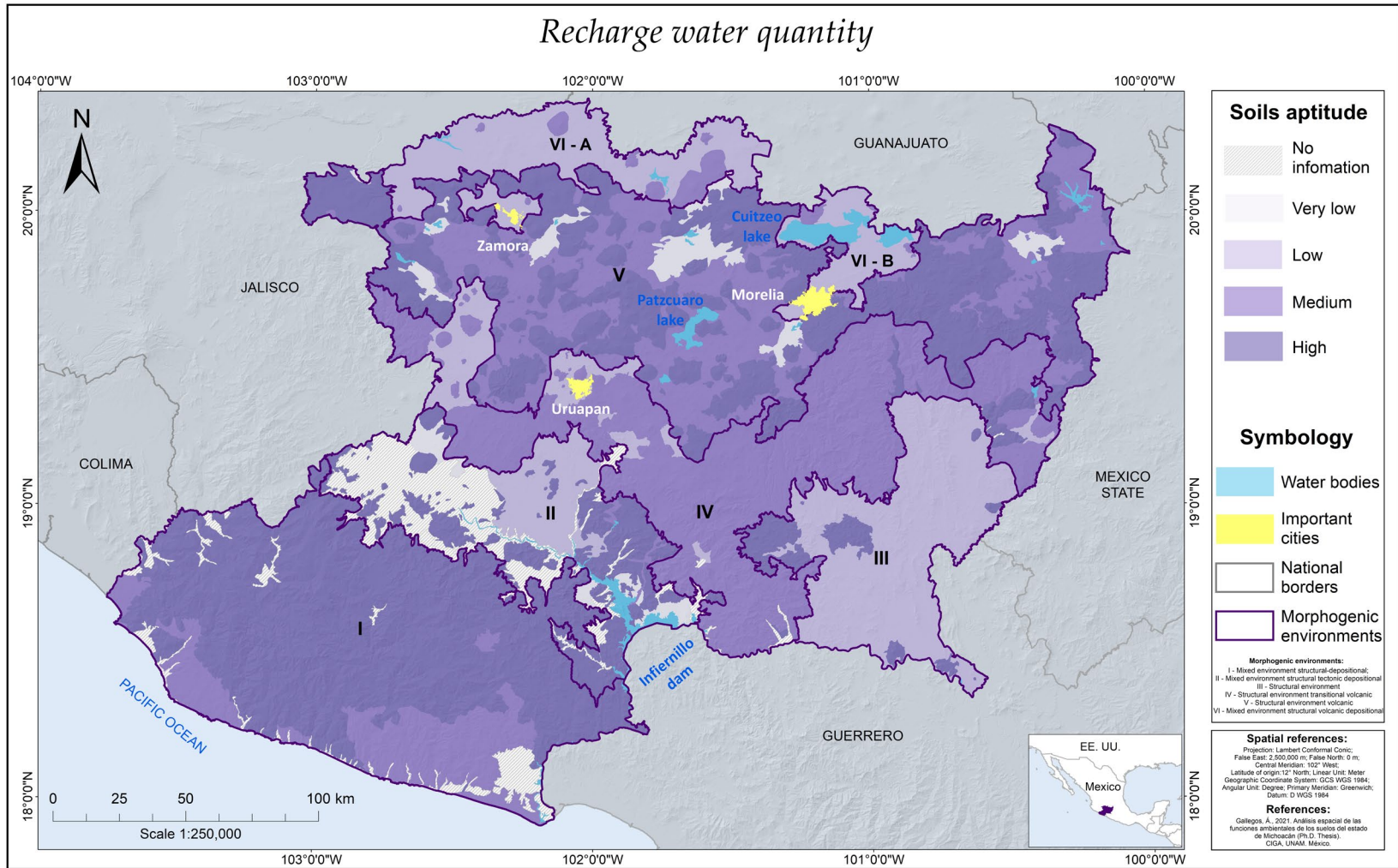
Mapa 4. Evaluación de la función de archivo histórico del estado de Michoacán, México



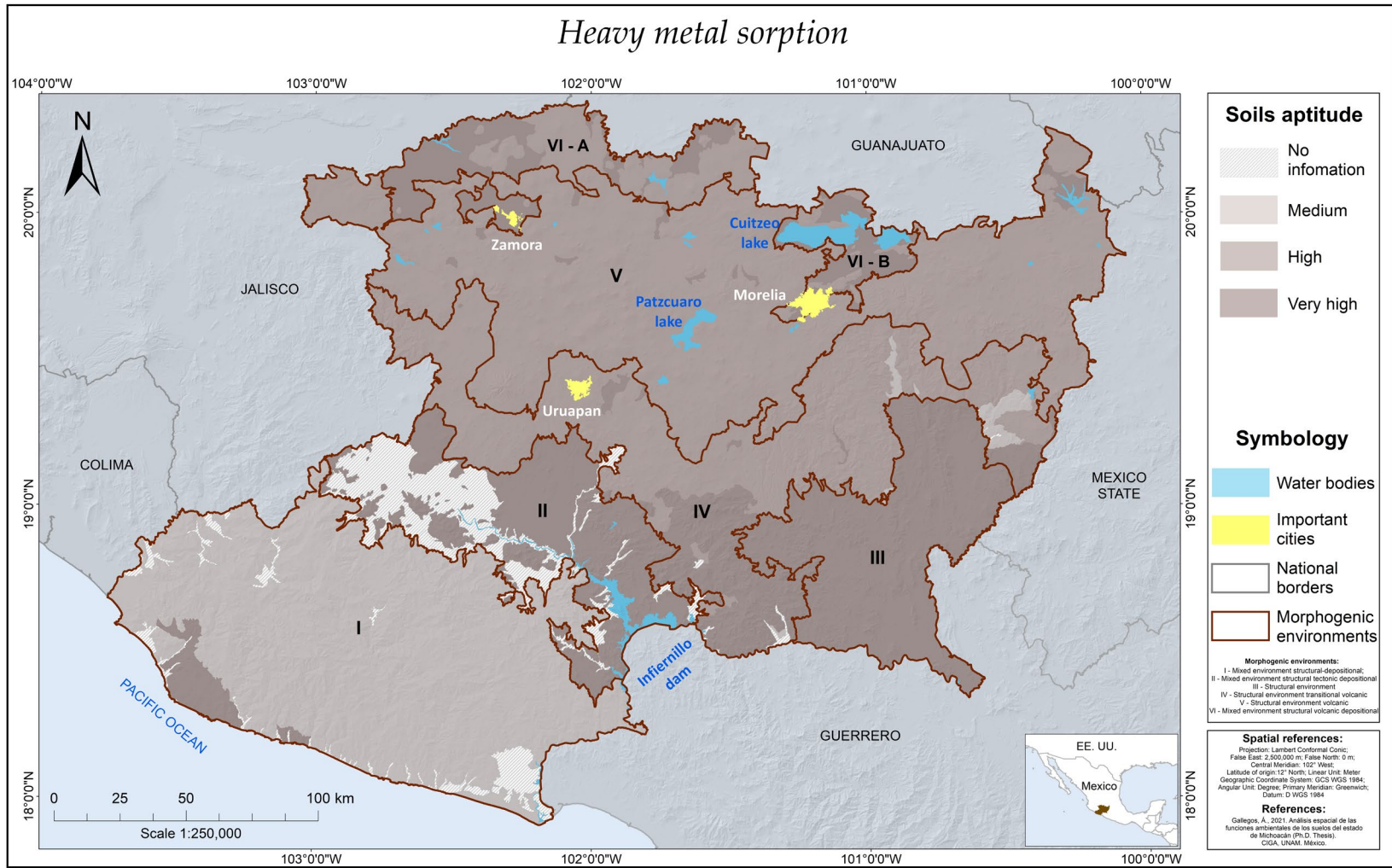
Mapa 5. Evaluación de la descomposición de compuestos orgánicos del estado de Michoacán, México



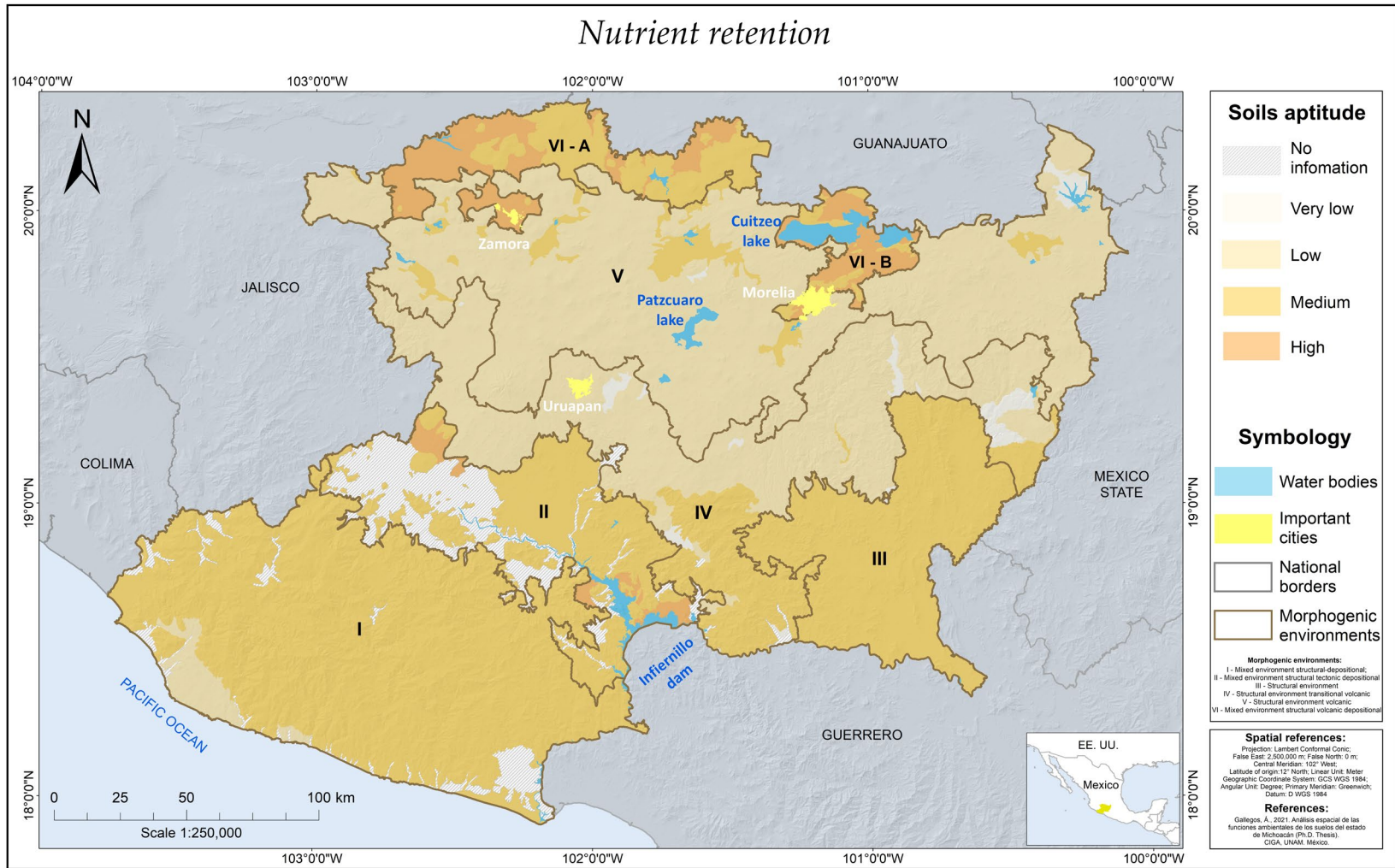
Mapa 6. Evaluación de la calidad de agua de recarga al acuífero del estado de Michoacán, México



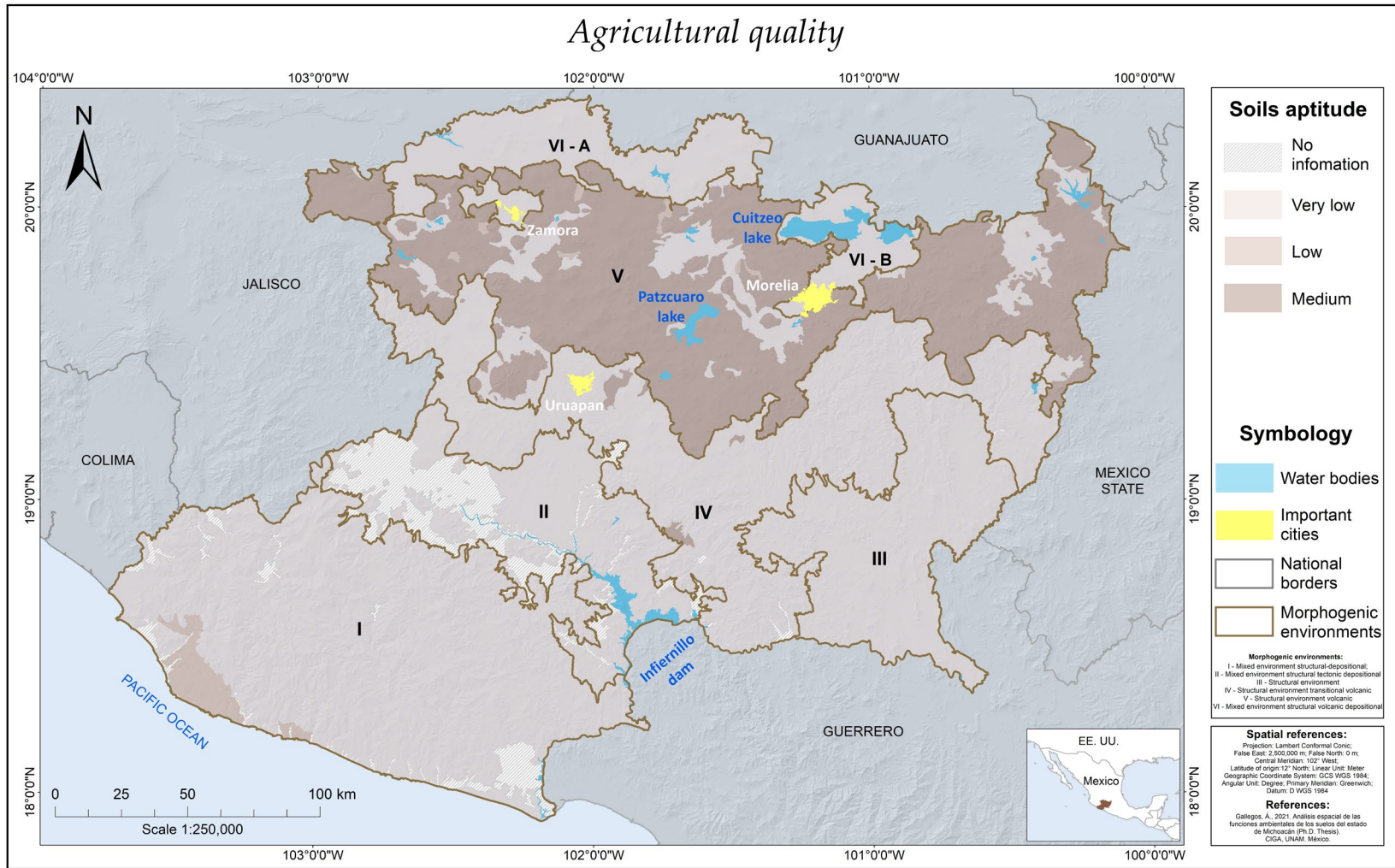
Mapa 7. Evaluación de la cantidad de agua de recarga al acuífero del estado de Michoacán, México



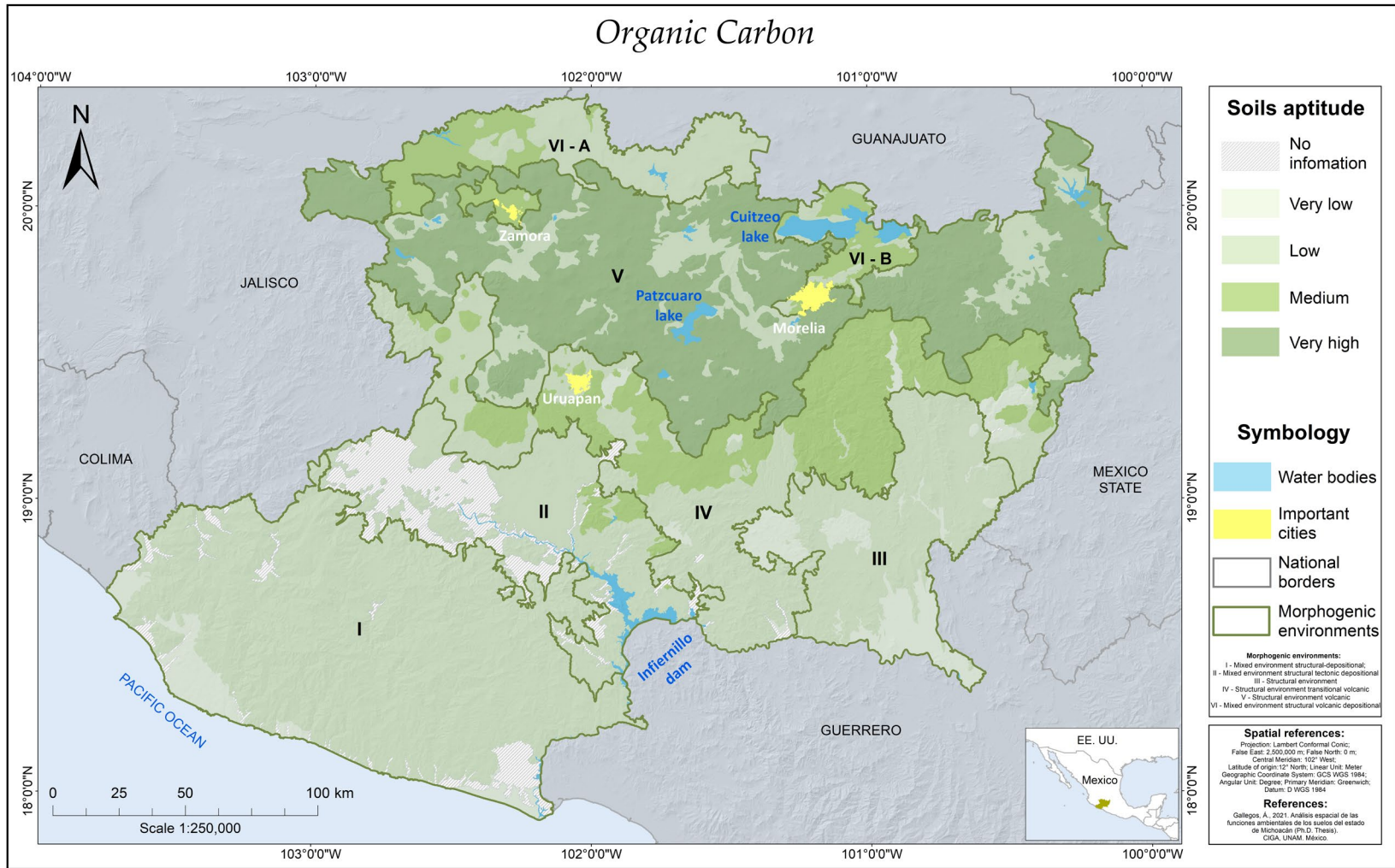
Mapa 8. Evaluación de la retención de metales pesados del estado de Michoacán, México



Mapa 9. Evaluación de la retención de nutrientes del estado de Michoacán, México



Mapa 10. Evaluación de la calidad agrícola del estado de Michoacán, México



Mapa 11. Evaluación del contenido de carbono orgánico del estado de Michoacán, México

4.5 Referencias del capítulo IV

- Aguilar, Y., & Bautista, F. 2011. Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer functions, spatial integration, and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13 (2), 221-232.
- Alcalá de Jesús, M., Hidalgo-Moreno, C., Gutiérrez-Castorena, M. C. 2009. Mineralogía y retención de fosfatos en Andisoles. *Terra Latinoamericana*, 27, 275-286.
- Bautista, F., Delgado, C., Estrada, H. 2008. Effect of legume mulches and cover crops on earthworms and snails. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 8(1), 45-60.
- Bautista, F., Campuzano, E., Delgado, C., Goguitchaichvili, A. 2017. Índices de sorción de metales pesados en suelos urbanos: el caso de Morelia, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 433-445.
- Bautista, F., Cram, S., Sommer, I. 2011. Suelos. En: Bautista, F. (Ed.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. pp. 227-258. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bautista, F., T. Ihl, I. Dubrovina y E. Antaramián. 2019. Diversidad climática y tendencias de cambio. En: *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2*, vol. I. CONABIO, México, pp. 41-46.
- Bautista, F.; Gallegos, A.; Pacheco, A. 2016. *Analysis of the environmental functions of soil profile data (Soil & Environment)*, 2nd ed.; Skiu: Ciudad de México, México.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., Ochoa, I., de la Cruz-Torres, E., Muraoka, T. 2019. Efecto del uso del suelo en las formas y disponibilidad de fósforo de un Andisol de la Meseta Purépecha, Michoacán. *Terra Latinoamericana*, 37: 35-44. <https://doi.org/10.28940/tl.v37i1.367>
- Bedolla-Ochoa, C., Bautista, F., & Gallegos, A. 2018. Environmental functions of smallholder farmer land classes in the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 265-274.
- Bocco, G., Mendoza, M. E., Velázquez Montes, A. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping. A tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39:211-219.
- Bouma, J. 2009. Soils are back on the global agenda: Now what?. *Geoderma*, 150 (1-2), 224-225. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.015>

- Bouwma, I., Schleyer, C., Primmer, E., Winkler, K. J., Berry, P., Young, J., Carmen, E., Spulerova, J., Bezák, P., Preda, E. 2018. Adoption of the ecosystem services concept in EU policies. *Ecosystem Services*, 29, 213-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.014>
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Comisión de las Comunidades Europeas (CCE). 2006. Propuesta de directiva del parlamento europeo y del consejo por la que se establece un marco para la protección del suelo y se modifica la Directiva 2004/35/CE. Bruselas: Autor.
- Day, R. P. 1965. Pipette method of particle size analysis C.A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp. 553-562.
- Dubrovina, I. A., Bautista, F. 2014. Analysis of the Suitability of Various Soil Groups and Types of Climate for Avocado Growing in the State of Michoacán, Mexico. *Eurasian Soil Science*, 47(5), 491-503. <https://doi.org/10.1134/S1064229314010037>
- Esri. 2016. ArcGIS for Desktop 10.5. Consultado el 08 de septiembre del 2021 en: <https://support.esri.com/es/products/desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-5>
- Esri. 2021. Documentación de ArcGIS Pro. Consultado el 09 de diciembre del 2021 en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/introduction-anatomy/anatomy-of-a-tool-reference-page.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. Guía para la descripción de suelos (4a Ed.). Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. Global soil partnership, technical report. State of the art report on global and regional soil information. Roma: Autor.
- Frank, E., Hall, M.A., Witten, H. 2016. The WEKA Workbench. Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques", Morgan Kaufmann, Fourth Edition.
- Gallegos, Á., García-Oliva, F., Pereira-Corona, A., Bautista, F. 2021. Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico. *Geoderma Regional*, 26, e00403. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00403>
- Gallegos, A., López-Carmona, D., Bautista, F., 2019. Quantitative Assessment of Environmental Soil Functions in Volcanic Zones from Mexico Using S&E Software. *Sustainability*, 11(17), 4552. <https://doi.org/10.3390/su11174552>

- Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., de Azcárate, J.G. 2015. Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 6, art13-art13.
- Hartemink, A. E. 2015. New Tools for Pedologists: Digital Soil Morphometrics, *Soil Horizons*, 56 (2), 1-2. <https://doi.org/10.2136/sh2015-56-2-gc>
- Ihl, T. 2019. Localización geográfica y regionalización. En: *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2*, vol. I. México: CONABIO, pp. 21-29.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2002. Conjunto de datos vectoriales Geológicos. Continuo Nacional. Minas otras ubicaciones geológicas. Escala 1:1, 000,000. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267612>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2004. Conjunto de datos Edafológicos Serie I. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Conjunto de datos vectoriales. Unidades climáticas. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012. Continuo de Elevaciones Mexicano Michoacán de Ocampo a 15m. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Conjunto de datos de Perfiles de suelos Serie II. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación. Serie VI. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2001. Edafología. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=eda251mgw>
- IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources. 2015th ed.; World Soil Resources Reports No. 106; World Soil Resources: Rome, Italy.
- Kleber, M., Jahn, R. 2007. Andosols and soils with andic properties in the German soil taxonomy. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 170, 317-328.
- McBratney, A., Mendonça-Santos, M., Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McBratney, A.; Field, D.J.; Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>

- Minasny, B., McBratney, A. B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
- Montiel-González, C., Gallegos, Á., Ortega-Gómez, A. M., Bautista, F. Gopar-Merino, F., Velázquez, A. 2018. Análisis climático para la agricultura de temporal en Michoacán, México. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 307-316. <https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1972>
- Nelson, D., Sommers, L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Wisconsin, EUA. pp. 539-577.
- Ortiz-Solorio, C. A., Gutiérrez-Castorena, M. C. 2001. La etnoedafología en México una visión retrospectiva. *Etnobiología*, 1, 44-62.
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., Brevik, E. C. 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation, and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7-13.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A. 2010. Propuesta para la delimitación semiautomatizada de unidades del paisaje. México: SEMARNAT. 104 p.
- Rhoades, J., 1982. Cation exchange capacity, in: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph*. Wisconsin, EUA, pp. 178–190.
- Rivieccio, R., Di Bene, C., Paolanti, M., Marchetti, M., Napoli, R. Soil rooting depth of Italy. *Journal of Maps*, 16(2), 36-42. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1690595>
- Schwalter, T. 2016. Chapter 14 - Decomposition and Pedogenesis. In: *Insect Ecology (Fourth Edition)*, Academic Press, pp. 477-510.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis Diario Oficial de la Federación, México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2015. Cartografía Geológica de la República Mexicana. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000>
- Zinc, A. (2012). *Geopedología, elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Enschede. The Netherlands: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 131 p.



Discusión y conclusiones generales



Discusión general

Los aportes principales de esta tesis son la identificación de los nuevos paisajes geopedológicos que constituyen a los ambientes morfogenéticos del estado de Michoacán y los modelos matemáticos generados con aprendizaje automático para la inferencia de las propiedades de los suelos.

Los productos obtenidos en este trabajo de tesis aportan una visión general de los suelos de Michoacán, de su distribución y funciones ambientales. La tarea pendiente que dará continuidad a las aportaciones de este proyecto de tesis, es la realización de estudios detallados, a escalas de detalle e incluso de parcela, en otras palabras, las aportaciones metodológicas y cartográficas de esta tesis (Cuadro 4) constituyen una línea base para la generación de productos cartográficos más detallados, por ejemplo, a escalas 1:50,000 o 1:25,000; lo cual será posible mediante: 1) el uso de capas de datos ambientales más finas, tales como modelos digitales de elevación a 15 m (INEGI, 2013), cartas geológico-mineras a escala 1:50,000 (SGM, 2021), o los insumos disponibles para el mapeo digital de suelos de la CONABIO (2016); y 2) la realización de más levantamientos edafológicos para la obtención de un mayor número de datos de perfiles de suelos.

Por otro lado, las evaluaciones de las funciones de los suelos que se presentaron en esta tesis consideraron el potencial intrínseco de los suelos, que se refiere a las funciones ambientales que puede ofrecer un suelo a partir de sus propiedades inherentes y a las condiciones del sitio. En el futuro, estas evaluaciones podrían complementarse integrando la noción del estado real de los suelos, que hace referencia a como las propiedades de los suelos tendrán un margen de mejora o afectación a partir de diferentes tipos de uso (Jörg Vogel et al., 2019). De igual manera, el futuro de las evaluaciones de las funciones ambientales y servicios ecosistémicos de los suelos se vislumbra en la asignación de un valor económico. (Comerford et al., 2013).

Si bien las nuevas tecnologías de análisis de datos para el estudio de los suelos se utilizan primordialmente en países desarrollados, debido principalmente a la falta de vinculación entre ciencia y tecnología que existe en los países menos desarrollados

(Padarian et al., 2020), los estudios presentados en esta tesis son un ejemplo de que la nueva ciencia del suelo, la del siglo XXI, se desarrolla exitosamente en México.

Cuadro 4. Aportaciones metodológicas y cartográficas del proyecto de tesis

Aportación	Uso	Camino a seguir
Método de procesamiento de imágenes de perfiles de suelos para la delineación de horizontes y cuantificación de los fragmentos gruesos.	El uso principal es la estimación de propiedades de los suelos con un enfoque cuantitativo y precisión conocida.	Desarrollo de nuevos modelos de inferencia para la estimación de otras propiedades de los suelos, tales como la densidad de raíces, compactación de horizontes, drenaje, tipos de estructura, entre otras.
Funciones de pedotransferencia para la estimación de la densidad aparente de los suelos de zonas volcánicas.	Complementar las bases de datos de perfiles de suelos del INEGI para realizar la evaluación de las funciones ambientales.	Generación de nuevas funciones de pedotransferencia para la estimación de propiedades de los suelos de difícil medición que consideren las características particulares de diferentes tipos de suelos.
Modelos de evaluación de las funciones ambientales calibrados para suelos de zonas volcánicas.	Evaluar las funciones ambientales de suelos de zonas volcánicas.	Nuevos modelos de evaluación adaptados a las características particulares de diferentes grupos de suelos.
Base de datos de 212 perfiles de suelos del estado de Michoacán actualizados con la nomenclatura WRB (2015).	Generación de mapas de la distribución espacial de los tipos y funciones ambientales de los suelos.	Ampliar la información de los perfiles de suelos realizando nuevos muestreos.
Base de datos de la evaluación edafo-ecológica y evaluación de 10 funciones ambientales de 191 perfiles de suelos del estado de Michoacán.	Insumos útiles para futuros estudios de caso a nivel local.	
Delimitación de los paisajes geopedológicos y ambientes morfogenéticos del estado de Michoacán (mapas y shapes).	Base para la generación de nueva cartografía del estado a escalas más detalladas.	Mejorar la delimitación de los paisajes geopedológicos y ambientes morfogenéticos conforme se tenga más información disponible.
Funciones ambientales de los suelos del estado de Michoacán (mapas y shapes).	Base para la generación de nueva cartografía de los suelos del estado a escalas más detalladas.	Generar mapas de las funciones ambientales de los suelos de Michoacán a escalas más finas.

Conclusiones generales

La integración de los enfoques tradicional y digital del mapeo de suelos permitió el desarrollo de una metodología híbrida para la generación de los primeros mapas a escala de reconocimiento de las funciones ambientales de los suelos del estado de Michoacán.

En Michoacán existe una gran diversidad de suelos, que posee un marcado contraste de sus tipos y capacidades entre subprovincias fisiográficas y ambientes morfogenéticos. De forma general, los mejores suelos, en términos de su aptitud para realizar las funciones ambientales, se encuentran en el Eje Neovolcánico Transmexicano, en los ambientes IV y V. Sin embargo, de forma particular, cada ambiente, paisaje y suelo, puede tener un buen o mal potencial que debe establecerse a partir de estudios a nivel local.

En este sentido, las metodologías propuestas y los mapas desarrollados en esta tesis son un punto de partida que avanzará hacia la generación de información edafológica interpretada a escala de detalle, que pueda ser utilizada en el futuro por diferentes tipos de usuarios para lograr una mejor toma de decisiones en torno al mantenimiento del recurso suelo y, en consecuencia, de las funciones y servicios que nos brindan.


Referencias

- Comerford, N. B., Franzluebbbers, A. J., Stromberger, M.E., Morris, L., Markewitz, D., Moore, R. 2013. Assessment and Evaluation of Soil Ecosystem Services. *Soil Horizons*, 53(3), 1-14. <https://doi.org/10.2136/sh12-10-0028>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2016. Mapeo digital de suelos. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Continuo de Elevaciones Mexicano. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Vogel, H., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Mareike L., Weller, U., Wiesmeier, M., Wollschläger, U. 2019. Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Front. Environ. Sci.*, 7, 164). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A. B. 2020. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. *SOIL*, 6, 35–52. <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2021. Índice de Cartas Esc. 50,000. <https://www.sgm.gob.mx/>



Apéndice I

A soil aptitude model for the establishment of a
cemetery in a Mexican volcanic area



Abstract: The study of the soil profile of cemeteries takes on great importance because they function as warehouses and pollutants regulators. This study was made to develop and apply an aptitude model of the soil profile for the construction and operation of a cemetery, seeking to protect public health in neighboring communities. This work had two stages: a) the elaboration of an aptitude model of the soil profile for the establishment of a cemetery, identifying the qualities that the soil should have to avoid pollution problems; and b) the application of the aptitude model in a soil profile from Michoacán, México. A suitable soil in a cemetery must decrease water percolation, have low slopes, a high theoretical retention of viruses and bacteria, and high sorption of heavy metals. Based on the aptitude model, the Eutric Vitric Cambisol (Clayic, Humic) has suitable and moderately suitable properties for the construction and operation of a cemetery. For the first time, a model is proposed for evaluating the soil profile aptitude for the establishment of a cemetery, considering environmental risks, the complete soil profile, and the expression of soil properties in surface units.

Keywords: soil properties, soil functions, environmental risks of cemeteries, human health risk

Introduction

Up until June 9, 2020, the COVID-19 pandemic generated 7.04 million infected people worldwide and more than 404 000 deaths (WHO 2020a). In Mexico, the numbers up to that date were 120 102 infected people and 14 053 deaths. This situation has caused the collapse of funeral services, crematoriums, and cemeteries in various countries, as well as in some Mexican states.

Cemeteries could be a source of pollution for soils (Spongberg & Becks, 2000), air (Łukaszuk et al., 2015), and groundwater (Jonker & Olivier, 2012; Żychowski & Bryndal, 2014) due to the compounds of decomposing bodies and substances used in burials, drugs from medical treatments, pathogenic bacteria and virus release, as well as those substances used in the embalmed of corpses. Unfortunately, poorly managed and poorly located cemeteries can become a public health problem (Jonker & Olivier, 2012). For example, the

decomposing body produces leachate with a volume of 0.4 to 0.6 L per kg of body weight, which is made up of salts, organic compounds (Łukaszuk et al., 2015), and pathogenic microorganisms such as bacteria (Całkosiński et al., 2015) and fungi (Sidrim et al., 2010). Groundwater near cemeteries has high concentrations of intestinal flora, ions, and amino acids, such as putrescine and cadaverine (Żychowski, 2012). Bacteria, fungi, and unstable gas concentrations, such as phosphine and ethylene, have been found in the air near cemeteries (Całkosiński et al., 2015; Łukaszuk et al., 2015).

The study of pollution in cemeteries soils becomes important because cemeteries work as warehouses and regulators of pollutants. If the pollutants exceed the soil capacity, heavy metals and harmful toxins can be released to the aquifers and the atmosphere. Cemeteries are a special type of landfill that stores corpses, artifacts, such as clothing, iron nails, metal from coffins (Üçisik & Rushbrook) substances, such as formaldehyde and phenol, used in the preservation of corpses (Reyes-Aguilar, 2007); and gases released during body decay (Całkosiński et al., 2015; Żychowski, 2012).

The increasing demand for graves makes necessary a well thought selection of lands for cemetery establishment and operation (Liu et al., 2012; Santarsierro et al., 2000). The objectives of this study are a) to develop a soil profile aptitude model for the construction of a cemetery in the central region of Mexico; and b) to apply the model in a soil profile located in the volcanic zone of Michoacán, Mexico, in order to avoid public health problems.

Materials and methods

This work involved two stages: a) the development of a soil profile aptitude model for the construction and operation of a cemetery; and b) a case study with the application of the model in a soil profile located in the state of Michoacán, Mexico (Figure 1).

Development of the aptitude model

Based on bibliographic review, the environmental risks associated with the establishment and operation of cemeteries and the properties of the soils that could mitigate these environmental risks were identified.

The aptitude intervals of the soil profile properties were established based on the physical and chemical properties expressed in area units, that is, with the pedo-ecological evaluation obtained from the Soil & Environment software (Bautista et al., 2016; Gallegos et al., 2016).

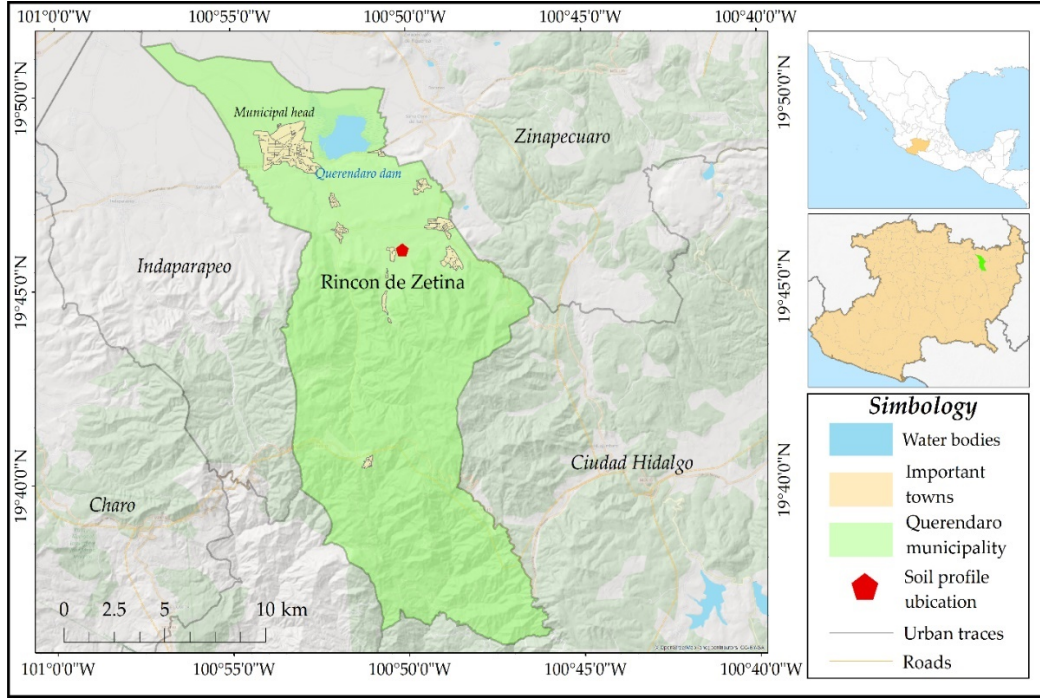


Figure 1. Study site location

The pedo-ecological evaluation of the soil profile was performed with the following equations:

$$PV_t (L m^{-2}) = \sum_{i=n}^{i=1} TH_i [dm] * \left(1 - \left(\frac{CR_i [\%Vol.]}{100}\right)\right) * PV_i [\%Vol.] \quad (1)$$

$$FE_t (kg m^{-2}) = \sum_{i=n}^{i=1} BD_i [g cm^{-3}] * TH_i [dm] * \left(1 - \left(\frac{CR_i [\%Vol.]}{100}\right)\right) * 100 \quad (2)$$

$$FC_t (L m^{-2}) = \sum_{i=n}^{i=1} TH_i [dm] * \left(1 - \left(\frac{CR_i [\%Vol.]}{100}\right)\right) * CC_i [\%Vol.] \quad (3)$$

$$CEC_t (mol m^{-2}) = \sum_{i=n}^{i=1} FE_i [kg m^{-2}] * CEC_i [cm kg^{-2}] * 0.01 \quad (4)$$

$$AC_t (L m^{-2}) = \sum_{i=n}^{i=1} TH_i [dm] * \left(1 - \left(\frac{CR_i [\%Vol.]}{100}\right)\right) * CA_i [\%Vol.] \quad (5)$$

Where PV represents porous volume; FE fine earth; FC field capacity; CEC cation exchange capacity; AC aeration capacity; BD bulk density; TH horizon thickness; and CR volume of coarse fragments.

Case study: Application of the soil profile aptitude model

The soil profile aptitude model for the establishment of a cemetery was evaluated through a case study with a profile located in the geographic coordinates 19°46'0.97"N and 100°50'07.53" W, in the state of Michoacán, Mexico. A soil pit was made, and the soil profile was described using the FAO manual (FAO, 2006), and 2 kg of soil per horizon were collected. The soil samples were dried in the shade and sieved.

The measured properties in the laboratory were electrical conductivity, pH, organic matter (Nelson & Sommers, 1982), cation exchange capacity, interchangeable bases (Rhoades, 1982), texture (Day, 1965), and the plastic and liquid limits of Atterberg (ASTM, 2000). The soil profile was classified based on the standards of the World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2015).

The following environmental functions of the soil profile were evaluated: human habitat, decomposition of organic compounds, aquifer recharge, absorption and adsorption of heavy metals, and nutrient retention. These soil environmental functions are related to the environmental pollution risks that come from cemeteries (Bautista et al., 2016; Gallegos et al., 2016).

Results

Soil profile aptitude model for the establishment of cemeteries

A suitable soil for the establishment of a cemetery must attend the following aspects: slow water percolation through soil profile; low terrain slope values; virus and bacteria retention; deep B horizons because the bodies are buried at least 2 meters; and

high sorption of heavy metals (Figure 2). Considering the soil properties that control these processes, three aptitude classes were established.

The suitable class (A1) for soil properties that control environmental pollution processes; a moderately suitable class (A2) when soil properties present some limitation for control of pollution processes; a marginally suitable class (A3) when soil properties have several limitations for pollution control; and an unsuitable class (NA) when soil properties are insufficient to control pollution processes (Table 1).

A soil with a high capacity to regulate the leaching of contaminants must have indicators, such as low terrain slope values, because high terrain slopes favor the flow of water on the ground surface, high field capacity, low aeration capacity ($\leq 40 \text{ L m}^{-2}$), and a clayey texture. These soil properties would prevent contaminants from the decay of human bodies to reach to the aquifer (Üçisik & Rushbrook, 1998).

A soil with a suitable class in the evaluation of its properties would also have the ability to retain heavy metals (with a clay quantity greater than 3 kg m^{-2}), pH values slightly towards strong alkaline, and an organic carbon quantity greater than 0.8 kg m^{-2} (Bautista et al., 2017).

Soils with unsuitable classes for cemetery construction are those with expansive clays (vertic properties); unstable organic soils (Histosol) and soils that are flooded either by extreme rains (Stagnosol) or by the rise of the aquifer (Gleysol).

Application of the soil profile aptitude model for the establishment of a cemetery

The soil profile evaluated is a young soil with a sequence of genetic horizons A-Bw, that is, the first 29 cm of the profile correspond to a mineral horizon with organic content (horizon A), from 29 to 174 cm the soil transitions towards horizon B with evidence of edaphogenetic alterations, which is denoted with the suffix w. The Bw horizon was divided into four horizons based on changes in color, bulk density, and structure size.

The evaluated soil profile had intermediate values of bulk density, angular blocks structure, and textures with more than 30% clay presence. There was no occurrence of thick

fragments. The pH was moderately acidic to slightly acidic, and the electrical conductivity indicates that horizons were not saline.

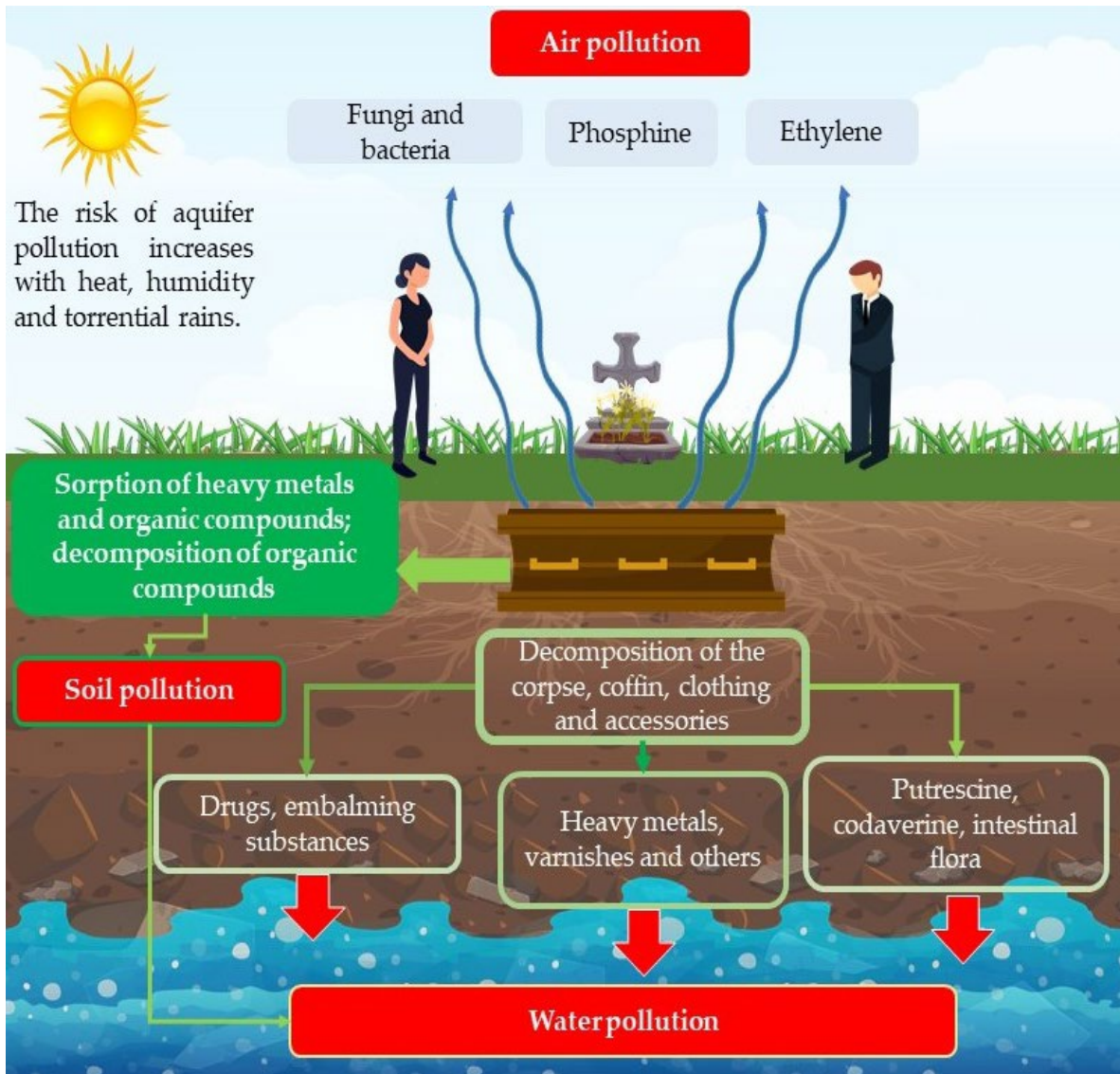


Figure 2. Contaminants generated in the cemeteries retained in the soil

The soil profile presented values greater than 50% of liquid limit, more than 20% plastic limit, and between 30% and 50% plasticity index in all horizons. According to its mechanical properties, the soil was classified as highly plastic clay (Table 2).

Table 1. Aptitude intervals of soil properties for the construction of cemeteries

Properties		A1	A2	A3	NA
In the soil profile	Field capacity (L m ⁻²)	>200	>100 - 200	50-100	≤50
	Bulk density (g cm ⁻³)	≥1.2 - <1.6	1.0 -1.2	0.7-1.0	≥1.6 o < 0.7
	pH	8 - 7	>6 - 7	5 - 6	≤5
	Cation exchange capacity (mol m ⁻²)	>200	>100 - 200	50 -100	≤50
	Clay content (kg m ⁻²)	>300	>200 - 300	200-100	≤100
	Organic matter (kg m ⁻²)	>20	>10-20	5-10	≤5
In the site	Aquifer depth (m)	>3	>2 - 3	1-2	> 1
	Slope inclination (%)	>1 – 5	>5 - 10	10 - 15	>15

A1=suitable class; A2=moderately suitable class; A3=marginally suitable class; NA=unsuitable class. Source: elaboration from (Bautista et al., 2016; Bautista et al., 2017; Üçisik & Rushbrook, 1998).

Based on the WRB classification scheme (IUSS Working Group WRB, 2015), the soil profile was named as a Eutric Vitric Cambisol (Clayic, Humic). Based on the Atterberg limits, it was determined that the Eutric Vitric Cambisol (Clayic, Humic) can be tamped with little effort and has high compressibility in a compact and saturated state, indicating that the soil mass decreases under the effect of load (low bearing capacity).

The soil has poor resistance to shear stress, which implies low resistance to landslides under load; and a low susceptibility to undermining, as it slowly allows water to pass through, resisting internal erosion. This soil material was classified as highly plastic clay, which implies a null permeability in a compact state.

Based on the pedo-ecological evaluation, the drainage inside the profile is moderate. The percolation may be restricted due to the high proportion of clays, the low value of aeration capacity (59.35 L m⁻²) and the intermediate value of hydraulic conductivity (27 cm d⁻¹) (Table 2). The field capacity (593.84 L m⁻²) indicates a high amount of water that can be retained in the micropores, which implies enough rainwater retention for the pollutants' attraction effect from clays to work until water reaches the aquifer. However, this process is carried out slowly.

Table 2. Chemical and physical soil profile properties

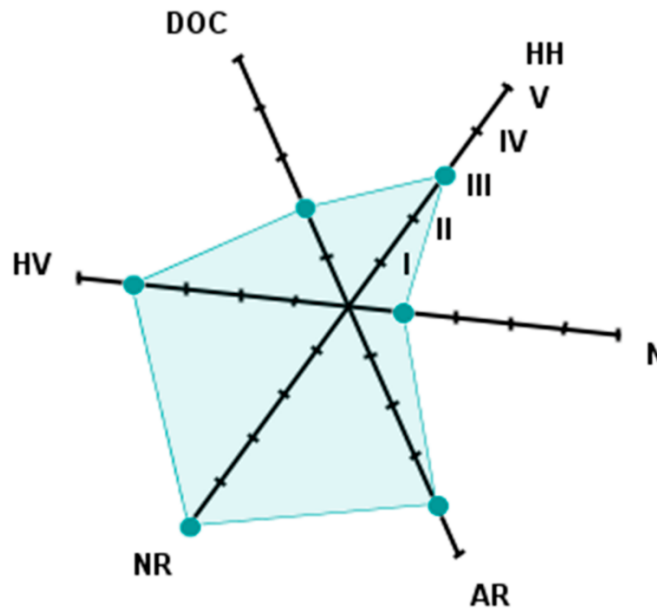
Depth cm		0-29	29-48	48-84	84-146	146-174
Horizon		A	Bw1	Bw2	Bw3	Bw4
Color	Dry	7.5 YR 5/4	7.5 YR 4/4	7.5 YR 4/4	7.5 YR 5/4	7.5 YR 6/4
	Wet	7.5 YR 3/3	7.5 YR 2.5/3	7.5 YR 2.5/3	7.5 YR 3/4	7.5 YR 4/4
Organic matter (%)		2.88	0.61	0.66	0.45	0.26
Bulk density (g cm ⁻³)		1.24	1.26	1.18	1.22	1.24
pH (H ₂ O)		5.32	5.72	6.00	6.32	6.33
EC (dS m ⁻¹)		0.70	0.50	0.58	0.12	0.22
CEC (cmol kg ⁻¹)		19.94	19.40	23.72	25.87	21.02
Ca (cmol kg ⁻¹)		6.17	9.72	10.10	6.07	3.27
Mg (cmol kg ⁻¹)		1.18	1.85	2.23	1.33	1.05
Na (cmol kg ⁻¹)		0.11	0.14	0.14	0.21	0.17
K (cmol kg ⁻¹)		1.07	1.20	1.10	1.00	0.29
Structure	Type	BSA y BA	BA	BA y BSA	BA y BSA	BSA y BA
	Size (cm)	15 - 22	8 - 10	10 - 14	10 - 18	22
	Stability	High	Very low	Very low	Very low	Very low
Texture	Sand (%)	35	30	33	41	53
	Silt (%)	9	7	7	9	9
	Clay (%)	56	63	60	50	38
Allophane	Al active	Negative	Yes, strong	Yes, strong	Negative	Negative
Atterberg limits	Liquid limit	56	78	76	65	52
	Plastic limit	22	27	23	24	22
	Plasticity index	34	51	53	41	30
	Material classification	High plasticity clay	High plasticity clay	High plasticity clay	High plasticity clay	High plasticity clay

EC=electric conductivity; CEC=cation exchange capacity; BSA=subangular blocky structure; BA=angular blocky structure; Source: field and laboratory soil profile analysis.

The Eutric Vitric Cambisol (Clayic, Humic) presented an intermediate aptitude for the human habitat function (Figure 3). This result is associated with its weak stability of aggregates, causing dust formation in the environment, which can potentially cause gastric or pulmonary diseases. This characteristic must be considered during the construction of crypts since previous compaction of soil is necessary to ensure a solid base to avoid vault cracking.

The evaluation of the soil naturalness function resulted in a very low aptitude for the soil profile. In the case of the cemeteries construction this is an adequate aptitude, since can be assured that there will be no loss of native flora and fauna due to the land use change.

Eutric Vitric Cambisol (Clayic, Humic)



I very low; II low; III intermediate; IV high; V very high

DOC= descomposicion of organic compounds; HH= human habitat; N= naturalness
AR=aquifers recharge; NR=nutrient retention; HV= heavy metals

Figure 3. Environmental functions of the soil profile evaluated in Michoacán, México

The function of decomposing organic compounds obtained a low aptitude, which implies that this soil does not have adequate conditions to decompose and transform chemical substances through microorganisms.

The aquifer recharge function obtained a high filtration capacity and a high amount of recharge (Figure 3). For the establishment of cemeteries, a lower recharge amount may be more desirable. However, due to the number of clays in this soil and the high field capacity, the infiltration rate will be slow, allowing the soil to retain contaminants.

The function of sorption (adsorption, precipitation, and chelation) of heavy metals had a low capacity at a 5 cm depth, mainly due to the pH value of the surface horizon.

However, at a greater depth, the capacity improved. Considering the high clay content of the evaluated soil and the depth at which bodies are buried (at least two meters), this soil is suitable to perform the role of sorption of heavy metals.

Applying the aptitude model for the establishment of a cemetery in the Eutric Vitric Cambisol (Clayic, Humic), it was determined that, due to field capacity, bulk density, textural class, cation exchange capacity, clay content, organic matter and land slope, the soil profile is suitable. However, aeration capacity and pH presented moderately suitable values (Table 3).

Table 3. Aptitude classes of the soil profile evaluated in Michoacán, México

Properties		Evaluated profile	Aptitude class
In soil profile	Field capacity (L m ⁻²)	593.84	A1
	Bulk density (g cm ⁻³)	1.18 - 1.26	A2
	pH	5.32	A3
	Cation exchange capacity (mol m ⁻²)	487.56	A1
	Clay content (kg m ⁻²)	985.27	A1
	Organic matter (kg m ⁻²)	18.02	A2
In the site	Aquifer depth (m)	>3	A1
	Slope inclination (%)	5	A1

A1=suitable class; A2=moderately suitable class; A3=marginally suitable class; NA=unsuitable class. Source: elaboration from field and laboratory data of the profile, and the proposed aptitude model.

Discussion

Usually, the models for evaluating the suitability of soils for any use are expressed in units of mass or percentages and in the “arable layer” or at surface level of about 30 cm (Bautista et al., 2017; De la Rosa et al., 2004; Dubrovina & Bautista, 2014). However, as soil is three-dimensional and often includes more than one horizon, evaluation of the aptitude of the complete profile must be carried out considering soil properties expressed in area units, as proposed in this work.

The function of decomposing organic compounds is based on soil capacity to produce, decompose, and transform chemical substances by microorganisms (Gallegos et al., 2016). The aquifers recharge function evaluates soil capacity to filter and infiltrate water into the aquifer. Therefore, it is essential to evaluate the leaching of contaminants.

The function of heavy metals sorption had great relevance in the evaluation of the profile since materials used in the construction of coffins are sources of heavy metal pollution. Given that humans are sensitive organisms to heavy metals, their retention in soils is essential for reducing public health problems (Bautista et al., 2017).

In the case of soil properties that were evaluated as restrictive in this case study, and seeking the protection of local environment as well as the protection of employees, nearby residents and visitors to the cemetery, the following is proposed: lime should be added and the soil should be compacted; headstones should be austere and small; wooden coffins should be used with no varnish nor decorations; and people must wear protective equipment during visits and take a shower when they leave the cemetery.

Funeral home employees must wear appropriate boots, gloves, and masks during work related to burials or exhumations, and they should wash their hands and take a shower before leaving the cemetery. As much as possible, coffins with high metal loads, such as ornaments, nails, and varnishes containing heavy metals or toxic organic compounds, should be avoided (Żychowski & Bryndal, 2014), so wooden coffins without chemical treatments should be preferably used. These coffins, in addition to reducing the risk of heavy metal pollution in soils, are more economical (Table 4).

It is recommended that the bottom of the pit, the subsoil, be compacted and limed in order to reduce infiltration and promote the absorption of heavy metals (Bautista et al., 2017; Hesham, 2013).

Since the soil study showed fine textures, medium bulk densities, low aggregate stability, high water retention, and high plasticity, the use of small headstones is recommended. It is not recommended to build vertical vaults (niches) due to low resistance to soil shear stress (FAO, 2003).

When there is low stability of aggregates and average values of apparent density, the soil will be dusty if the vegetation cover is removed, so it is recommended to cover the entrances and roads of the cemetery with sand, gravel, or preferably with cement or asphalt. In this way the excessive generation of dust that could damage visitors' lungs will be prevented (WHO, 1999).

Table 4. Costs of different types of coffins in Mexico

Material	Coffin type	\$ MXN	\$USD
Cardboard	Buildable economic coffin	800.00	36.00
	Economic coffin	1,000.00	45.00
	Mid-end coffin	1,500.00	67.50
	High-end coffin	3,500.00	157.50
Wood	Economic, buildable, incinerable coffin	1,612.00	72.54
	Economic coffin, incinerable	3,490.00	157.05
	Economical coffin, fine finish	6,500.00	292.50
	Luxury coffin	35,616.00	1,600.00
Metal	Basic coffin	7,791.00	350.00
	Luxury coffin	16,500.00	742.39
	Luxury coffin, high-end	55,650.00	2,500.00

Source: market prices in Mexico.

In the context of the COVID-19 pandemic, health authorities recommend that the final disposal of corpses be preferably made through cremation and, if this is not possible, through grave or vault burial (Gobierno de México, 2020; WHO, 2020b). As discussed in this study, soils have an intrinsic ability to regulate compounds and substances from the decomposition process of bodies and burial artifacts, including viruses and bacteria. However, not all soils have the same buffering capacity, so it is necessary, in addition to applying the biosecurity measures indicated by health authorities, to make an adequate selection of sites for burials in order to ensure human health protection. The burial of COVID-19 pandemic victims at appropriate sites is also a way to prevent or lessen the collapse of cremation services during contingency.

Conclusions

For the first time, a model for evaluating the aptitude of the soil profile for the establishment of a cemetery is proposed considering the complete profile and expressing soil properties per unit area. Soil properties should be indicative of low infiltration; high retention and decomposition of organic compounds; high sorption of heavy metals, and a high bearing capacity.

Regarding the application of the model in the state of Michoacán, Mexico, the soil is suitable with minor restrictions that can be overcome by compacting the soil and liming it to increase pH value. The mechanical properties indicated that the soil has a low bearing capacity, so it is recommended to build small and lightweight graves. In other words, if the cemetery construction and management recommendations are followed at the selected site, there will be no room for the presence of public health problems.

References

- ASTM. (2000). ASTM D4318-00, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Obtenido de: www.astm.org
- Bautista, F., Campuzano, E., Delgado, C., & Goguitchaichvili, A. (2017). Índices de sorción de metales pesados en suelos urbanos: el caso de Morelia. *Boletín la Soc. Geológica Mex.* 69(2), 433-445. Obtenido de: <https://www.jstor.org/stable/26461906>
- Bautista, F., Gallegos, A., Pacheco, A. (2016). *Analysis of the environmental functions of soil profile data (Soil & Environment)* (2nd Ed). Mexico, Ciudad de México: Skiu.
- Całkosiński, I., Płoneczka-Janeczko K., Ostapska, M., Dudek, K., Gamian, A., Rypuła, K. (2015). Microbiological Analysis of Necrosols Collected from Urban Cemeteries in Poland. *BioMed Research International*, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1155/2015/169573>
- Day, R.P. (1965). Pipette method of particle size analysis. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis* (pp. 553–562). Madison, Wisconsin, EUA: American Society of Agronomy.

- De la Rosa, D., Mayol, F., Díaz-Pereira, E., Fernández, M., & De la Rosa, D. (2004). A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection: With special reference to the Mediterranean region. *Environ. Model. Softw.*, 19, 929–942. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2003.10.006>
- Dubrovina I., & Bautista, F. (2014). Analysis of the Suitability of Various Soil Groups and Types of Climate for Avocado Growing in the State of Michoacán, Mexico. *Eurasian Soil Science, Agricultural Chemistry and Soil Fertility*, 47(5): 491-503. Doi: <https://doi.org/10.1134/S1064229314010037>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2003). Colección FAO capacitación. Suelo. Diversas propiedades del suelo. Consultado 10-03-20 en: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s10.htm#top
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2006). *Guidelines for Soil Description* (4th Ed.). Management Service Information Division FAO: Rome, Italy, 2006.
- Gallegos, A., Bautista, F., & Dubrovina, I. (2016). Software to evaluate the environmental functions of soils. *Softw. Syst*, 2, 195–200. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.114.195-200>
- Gobierno de México. (2020). *Guía de manejo de cadáveres por COVID-19 (SARS-CoV-2) en México*. Ciudad de México, México: Gobierno de México. Available online: https://coronavirus.gob.mx/wp-content/uploads/2020/04/Guia_Manejo_Cadaveres_COVID-19.pdf
- Hesham A. H. I. (2013). Geotechnical Evaluation of Sub-grade Soils at the Cemeteries Area, New Tiba City, Luxor, Egypt. *Geosciences*, 3(2), 53-59. Doi: 10.5923/j.geo.20130302.03
- IUSS Working Group WRB. (2015). *World reference base for soil resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps* (ed. 2015). Rome, Italy: World Soil Resources.

- Jonker, C., & Olivier, J. (2012). Mineral Contamination from Cemetery Soils: Case Study of Zandfontein Cemetery, South Africa. *Int. J Environ Res Public Health*, 9(2): 511–520. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph9020511>
- Liu, P., Chen, S., & Liu, Y. (2012). Construction Planning of Eco-cemeteries in Daluo Mountain, Wenzhou City of China. *Journal of Landscape Research*, 4(9), 27-31. Doi: 10.16785/j.issn1943-989x.2012.09.009
- Łukaszuk, C., Krajewska-Kułak, E., Guzowski, A., Kraszyńska, B., Magdalena Grassmann, M., & Dobrowolski, R. (2015). Analysis of the incidence fungi in a crypt cemetery. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(9), 1141-1147. Doi: <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1068884>
- Nelson, D., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 2, Chemical and Microbiological Properties* (pp. 539–577). Wisconsin, EUA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Reyes-Aguilar, M. (2007). Anatomía humana y plastinación. *Bol Mex His Fil Med*, 10(1), 34-39. Available in: <https://www.medigraphic.com/pdfs/bmhfm/hf-2007/hf071f.pdf>
- Rhoades, J. (1982). Cation exchange capacity. In: Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 2* (pp. 178–190). Wisconsin, EUA: Agronomy Monograph.
- Santarsierro, A., Minelli, L., Cutilli, D., & Cappiello, G. (2000). Hygienic aspects related to burial. *Microchemical Journal*, 67(1-3), 135-139. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0026-265X\(00\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S0026-265X(00)00109-0)
- Sidrim, J., Moreira Filho, R.E., Cordeiro, R.A., Rocha, M.F.G., Caetano, E.P., Monteiro, A.J., Brilhante, R.S.N. (2010). Fungal microbiota dynamics as a postmortem investigation tool: focus on *Aspergillus*, *Penicillium* and *Candida* species. *Journal of Applied Microbiology*, 108(5), 1751-1756. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04573.x>

- Spongberg, A. L., & Becks, P. M. (2000). Inorganic soil contamination from cemetery leachate. *Water, Air, and Soil Pollution*. 117, 313–327. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1005186919370>
- Üçisik, A. S., Rushbrook, P., & World Health Organization. Regional Office for Europe. (1998). *The impact of cemeteries on the environment and public health: an introductory briefing*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. Available online: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/108132>
- World Health Organization (WHO). (1999). *Occupational and Environmental Health Team. Hazard prevention and control in the work environment: airborne dust*. World Health Organization. 224 pp. Available online: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66147>
- World Health Organization (WHO). (2020a). Coronavirus disease (COVID-19) Situation Report. Accessed on June 9, 2020. Available online: https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200609-covid-19-sitrep-141.pdf?sfvrsn=72fa1b16_2
- World Health Organization (WHO). (2020b). Prevención y control de infecciones para la gestión segura de cadáveres en el contexto de la COVID-19. Accessed on June 16, 2020. Available online: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331671/WHO-COVID-19-IPC_DBMgmt-2020.1-spa.pdf
- Żychowski, J. (2012). Impact of cemeteries on groundwater chemistry. A review. *Catena*, 93, 29-37. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.009>
- Żychowski, J., & Bryndal, T. (2014). Impact of cemeteries on groundwater contamination by bacteria and viruses – a review. *J Water Health*, 13 (2), 285-301. Doi: <https://doi.org/10.2166/wh.2014.119>