



CIENCIA DEL SUELO

Hacia un conocimiento global y
multidisciplinario del recurso suelo

División I: Suelos en espacio y tiempo:

Coordinadores: Dr. Joel Zavala Cruz, Dr. Antonio López Castañeda



Ciudad Universitaria UNAM, octubre del 2023

**Hacia un conocimiento global y
multidisciplinario del recurso suelo:
suelos en espacio y tiempo**

**Sociedad mexicana de la ciencia del
suelo**

Presidente

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Vicepresidente

Dr. Fabián Fernández Luqueño

Secretario técnico

Dr. Miguel Ángel Valera Pérez

Secretario general

Dr. Alfredo Madariaga Navarrete

Secretario de eventos nacionales e
internacionales

Dr. José Víctor Tamaríz Flores

Tesorero

Mtro. David Hernández Sánchez

Secretaría de educación y enseñanza

Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega

Secretaría de relaciones públicas

Dr. Gilberto Vela Correa

Secretaría de acción juvenil

Mtra. Martha Daniela Bobadilla
Ballesteros

Comité editorial del libro de resúmenes

Editores

Dr. Fernando Ayala Niño

Dr. Francisco Bautista

**Coordinadores de los fascículos del
libro**

División I: suelos en espacio y tiempo: Dr.
Joel Zavala Cruz y Dr. Antonio López
Castañeda

División II: propiedades del suelo y
procesos: Dr. Francisco Bautista y Dra.
Anahí Aguilera

División III: el uso y manejo del suelo: Dr.
David J. Palma López y Dr. Rufo Sánchez
Hernández

División IV: el papel de los suelos en la
sostenibilidad del medio: Dra. Ángeles
Gallegos, M en C. Juan David Mahecha y
Dra. Silvia Ramos

Cita sugerida:

Zavala-Cruz J., López-Castañeda A. (Compiladores). 2023. Suelos en espacio y tiempo, Vol 1. En: Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo. Bautista F y Ayala F. (Eds). Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. Texcoco, Estado de México. 96 pp.

Por este medio declaramos que los capítulos de libro fueron arbitrados a doble, triple y cuádruple ciego con la finalidad de contar con un libro de calidad. En total se contó con 32 arbitrajes de 16 capítulos.

ISBN OBRA COMPLETA: 978-607-95106-5-7 ISBN DEL VOLUMEN 1: 978-607-95106-6-4

DR © 2023. Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo.

Derechos reservados conforme a la ley. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida por cualquier medio, sin el consentimiento por escrito de la Sociedad mexicana de la ciencia del suelo o de los titulares correspondientes.

Las opiniones, datos y citas presentados en esta obra son responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja, necesariamente, los puntos de vista de la institución que edita esta publicación.

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

Hecho en México

Prólogo

El suelo, irrefutablemente, es un elemento vital para asegurar la permanencia y sobrevivencia de los seres humanos. Desde el punto de vista estructural, el suelo es un componente fundamental del paisaje; y desde el punto de vista funcional es el elemento que articula las relaciones entre los elementos vivos u orgánicos con los mínimos de elementos minerales de los ecosistemas. El suelo tiene funciones irremplazables y bien identificadas. La primera, es el principal elemento de soporte y anclaje para la sobrevivencia de la biodiversidad, en especial de las plantas. También contiene la función inherente de servir como un filtro y amortiguamiento para poder transformar toda una serie de diversos elementos orgánicos en elementos minerales. El suelo y su biota conforman un verdadero banco genético de interacciones vivas y minerales constantes. Otra de las funciones fundamentales del suelo es el papel regulador de los ciclos hidrológicos y captura y almacenamiento de carbón.

En general, los suelos tienen una relación con cuatro componentes del paisaje. El material parental o la roca de la cual derivan; el acomodo que se da en el contexto de las formas del relieve; las interacciones con la biota en la que se circunscribe; y el vínculo socio-cultural. Por esto el suelo se alude como la interfaz que sin su papel el ambiente no se entiende ni opera sustentablemente. El estudio del suelo incluye el soporte mecánico de elementos de su estructura, las características de los agregados que lo constituyen, rasgos de penetrabilidad, profundidad, nutrientes, material mineral que lo compone, así como la combinación de la textura, ya sea de limos, arcillas o de arenas. El pedón es la unidad mínima para estudiar y describir un suelo donde se observan, miden y estudia la cantidad de materia orgánica, humus que contiene y tipo de PH ya sea ácido, neutro o básico que caracteriza a cada horizonte. Todo esto en conjunto define las funciones y capacidades de almacenamiento de agua y aire y fertilidad. Por todo esto, la edafología como la ciencia avocada al estudio del suelo, es a menudo insuficiente para entender todas las interacciones.

Los procesos formadores de suelo tales como la calcificación, la mineralización, la salinización, entre otros, dan como resultado un mosaico muy complejo de tipos de suelo. Por lo tanto, la geografía de los suelos es un tema de crucial importancia y base para la definición de políticas ambientales.

El suelo no es ajeno a los disturbios que pueden darse, ya sean de origen natural o antropogénicos. La deforestación es uno de los temas más inmediatos en los que uno puede pensar que tiene un impacto directo sobre el suelo. Ésta, es generalmente acompañada de aspectos agropecuarios que afectan tanto la función como la estructura pues se introduce un componente de pisoteo y uso exacerbado. El cambio de uso de suelo de rural a urbano es mucho más impactante dado que conlleva al sellamiento lo que inhibe las funciones. Asociado al cambio de suelo, los contaminantes tienen un segundo

impacto en ocasiones irreversible. En este contexto, el estudio del suelo debe estar al centro de los estudios de estructura, función y salud ambiental.

Una de las líneas más interesantes desde mi punto de vista es el estudio del suelo desde la perspectiva sociocultural, o lo que se alude como edafología antropológica. El suelo tiene significados místicos, ideológicos, religiosos y por supuesto hasta productivos, por lo que su relación suelo-hombre es longeva como la existencia del *Homo sapiens*.

En el contexto de México, se sabe que existe más de 25 tipos de suelos que son muy distintos entre las diversas regiones, tanto por su diversidad geológica, climática y biogeográfica. México, no obstante, alberga solo un 10% de su superficie con suelos de vocación agrícola y el resto es preferentemente de vocación forestal. Adicionalmente, casi el 45% de los suelos nacionales presenta algún tipo de disturbio. Por lo anterior, la sustentabilidad no puede abordarse de manera congruente sin un buen levantamiento de suelos.

El estudio de los suelos, como se presenta en este libro, resulta relevante. El poder presentar los resultados de este trabajo que aquí se ilustra para dar a conocer la importancia que tiene el suelo, que en mi naturaleza de biólogo no puede ser distinta, o menos importante que lo que es el valor de la biodiversidad como elementos fundamentales para asegurar la sobrevivencia en el largo plazo de la vida en el planeta, incluyendo la de los humanos.

Sin suelo no hay maíz y sin maíz no hay país...

Dr. Alejandro Velázquez

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental

Universidad Nacional Autónoma de México

Prefacio

El presente volumen contiene 16 trabajos que reportan avances significativos en la generación de conocimiento nuevo sobre suelos en el espacio y tiempo. Los trabajos evidencian la preocupación de los investigadores ante la problemática generada por procesos degradativos del suelo y en consecuencia el demérito de sus funciones ambientales, promovida mayormente por actividades humanas no sustentables. En respuesta a la crisis ambiental en que se inserta el suelo, es notable la aplicación de métodos, enfoques y procedimientos en la generación de información objetiva y confiable para el diagnóstico, evaluación, análisis y la propuesta de alternativas de solución a instancias gubernamentales, productores, organizaciones agroindustriales y la sociedad en general.

Se abordan casos de estudio multidisciplinarios sobre geografía de suelos (con enfoques convencional y digital), calendario agrícola y conservación de suelo, micromorfología de suelos, paleosuelos, infiltración de agua en el suelo, aplicación de minerales para mejorar suelos agrícolas, cuantificación de gases de efecto invernadero (N₂O) y flujos de CO₂ en el suelo, impacto de usos agropecuarios y forestales en suelos de ladera, valoración de índices espectrales y factores edáficos a nivel de cuenca, y relación suelo-planta-atmósfera a escala ecosistémica. En particular, sobresale el esfuerzo de un grupo de investigadores para difundir información actualizada sobre suelos en dos estados de la república, utilizando las nuevas tecnologías de la comunicación mediante la aplicación para teléfonos inteligentes (app) y un museo virtual de suelos.

Los autores de los capítulos discuten los resultados con base en información científica actualizada, y en varios casos el procesamiento de los datos se apoya en Sistemas de Información Geográfica, evidenciando la fortaleza del uso de softwares para organizar y analizar la información, generando nuevos productos de investigación en suelos.

La información sobre suelos en espacio y tiempo puede ser útil para estudiantes de nivel licenciatura y postgrado, y motivar la generación de investigaciones sobre el recurso suelo, su uso, manejo y recuperación, para coadyuvar a su conservación y uso sustentable.

El conjunto de temas abordados también hace notar vacíos de lo que falta por investigar sobre suelos en espacio y tiempo. En particular destacamos los siguientes temas: a) generación de cartografía de suelos y bases de datos físicos y químicos a escalas semidetallada y detallada, en meso y microrregiones con uso actual y potencial semi intensivo e intensivo para cultivos y usos no agrícolas, para coadyuvar a la planeación y uso sustentable del suelo; b) evaluación de suelos degradados por actividades humanas (agrícola, ganadera, minera, industrial, urbana, portuaria, turística), y desarrollo de tecnologías sustentables para revertir los procesos, y promover la conservación y recuperación del recurso; c) difusión del conocimiento sobre los suelos en los estados del país, mediante el uso de nuevas tecnologías (app) para apoyar a los usuarios en la toma

de decisiones sobre usos extensivos; d) impulso a la aplicación de nuevos métodos de evaluación de suelos con apoyo de la geoestadística y pedometría, mayormente en regiones poco accesibles y con escasa información sobre el recurso.; h) evaluación de servicios ambientales del suelo en agroecosistemas y ecosistemas a nivel país y en regiones prioritarias, para generar políticas enfocadas al uso sustentable del recurso, en beneficio de la sociedad.

Dr. Joel Zavala Cruz

Dr. Antonio López Castañeda

Colegio de Postgraduados Campus Tabasco

Contenido

| | |
|---|----|
| AGUA EN EL CONTINUO SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA A ESCALA ECOSISTEMICA EN UN BOSQUE SECO EN SUCESION SECUNDARIA TEMPRANA | 11 |
| APLICACIÓN DE CAOLÍN Y COMPUESTO ELICITOR EN PEPINO BAJO CONDICIONES DE MALLA SOMBRA: PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE FRUTO | 16 |
| CALENDARIO AGRÍCOLA: ENTRE LA FIESTA Y LA CULTURA DEL CULTIVO | 22 |
| CARTOGRAFÍA DIGITAL DE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SAHUAYO | 26 |
| COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES ESPECTRALES Y FACTORES EDÁFICOS EN AMBIENTES DE RIBERA EN UNA SUBCUENCA DEL ALTO BALSAS..... | 31 |
| EL MAPA DE SUELOS DE CAMPECHE: LA INFORMACIÓN EDAFOLÓGICA EN TU SMARTPHONE | 37 |
| EL MAPA DE SUELOS DE MICHOACÁN EN TUS MANOS: UNA APP PARA SMARTPHONE..... | 43 |
| EL MUSEO VIRTUAL DE GEOGRAFÍA DE SUELOS DE MÉXICO..... | 49 |
| FRACCIONAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE UN ENFOQUE DE BALANCE ENERGETICO DEL SUELO Y EL DOSEL EN ECOSISTEMAS SEMIÁRIDOS | 54 |
| HACIA UNA SÍNTESIS DE DATOS DE FLUJOS DE CO ₂ DE SUELO EN MÉXICO | 60 |
| LA MICROMORFOLOGÍA DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA: 35 AÑOS DE INVESTIGACIÓN EN EL COLEGIO DE POSTGRADUADOS..... | 66 |
| MEDICIONES DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO EN LA ZONA MINERA DE HIDALGO | 71 |
| PALEOPEDOGÉNESIS PLEISTOCÉNICA EN LA CUBIERTA EDÁFICA ACTUAL: EVIDENCIAS MICROMORFOLÓGICAS..... | 76 |
| RETOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN DE N ₂ O DE SUELOS AGRÍCOLAS | 80 |
| TRANSECTO GEOPEDOLÓGICO EN UNA PLANICIE ALUVIAL DE TABASCO, MÉXICO..... | 86 |

UNIDADES DE SUELO-GEOFORMA-LITOLOGÍA CON AGAVE PULQUERO
EN LA REGIÓN POBLANO-VERACRUZANA..... 91

AGUA EN EL CONTINUO SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA A ESCALA ECOSISTEMICA EN UN BOSQUE SECO EN SUCESION SECUNDARIA TEMPRANA

Enrico A. Yépez^{1*}; Heira L. Luque-Apodaca¹; Myrbeth G. Madueño-Moreno¹; Nidia E. Rojas-Robles²; Juan C. Álvarez-Yépiz¹; Zulia M. Sánchez-Mejía¹; Jaime Garatuza-Payan¹

¹Instituto Tecnológico de Sonora, Cd. Obregón, Sonora, 85000, México; ²University of California Riverside, Riverside, California 92521, USA; *enrico.yepz@itson.edu.mx

RESUMEN

El contenido de agua del suelo controla la evapotranspiración y procesos fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas. Esta interconexión fundamental a través del flujo del agua, demanda esquemas de monitoreo de la entrada, acumulación y flujo de este recurso a escalas espaciales y temporales congruentes. Con un monitoreo continuo de tres años de la evapotranspiración real (ET) con el método de correlación de vórtices, la estimación de la humedad de suelo volumétrica del suelo con tecnología la detección de neutrones moderados provenientes de rayos cósmicos, y meteorología básica, en el presente trabajo se investigó el acoplamiento de la entrada de agua por lluvia, humedad de suelo y la ET en un rodal de bosque seco en recuperación después de ser deforestado en el noroeste de México. La integración de estas metodologías ofrece perspectiva sobre el fuerte acoplamiento de las entradas de lluvia y la disponibilidad de agua en el suelo ya que la recarga del agua del suelo en los primeros 30 cm de profundidad fluctúa en armonía con variabilidad de la lluvia, tanto en la temporada de crecimiento como en la de estiaje. Notamos además que la cantidad de agua que se evapotranspira varía entre el -4% y el 22% de la precipitación anual dependiendo de si los años son secos, húmedos o alcanzan el promedio histórico.

PALABRAS CLAVE: *Covarianza de vórtices; Evapotranspiración; Humedad de suelo; MexFlux; Rayos cósmicos.*

INTRODUCCION

La humedad del suelo es la variable clave en los procesos hidrológicos que se relaciona directamente con el funcionamiento de los ecosistemas. El contenido de agua del suelo controla la fenología de la vegetación, la evapotranspiración, la productividad primaria y los procesos de descomposición de la materia orgánica de los ecosistemas (Yepez y Williams, 2009). Por lo tanto, mejorar nuestro conocimiento de la dinámica de la humedad del suelo es esencial para una mejor comprensión de procesos eco-hidrológicos y las interacciones suelo-planta-atmósfera.

La humedad del suelo se puede estimar a diferentes escalas espaciales y temporales con diferentes métodos, pero a escalas amplias, (i.e. decenas de metros cuadrados), la detección de rayos cósmicos es una alternativa viable, que aporta información a escalas congruentes de estudios ecosistémicos. El método de rayos cósmicos se basa en la detección de neutrones moderados, bajo el principio de que el conteo de neutrones

disminuye cuando hay una interacción con el hidrógeno en el suelo, por lo tanto, se presenta como una tecnología emergente para evaluar el contenido de agua del suelo a escala de ecosistema (Desilets et al., 2010; Franz et al., 2012).

Los bosques secos tropicales en el noroeste de México son ecosistemas altamente fragmentados. Una condición generalizada en estos bosques son los rodales en sucesión secundaria temprana dominados por la leguminosa leñosa *Acacia cochliacantha* y herbáceas perennes como *Desmanthus* spp. en el sotobosque. Estos rodales forman parches densos de vegetación y de rápido crecimiento con una dinámica eco-hidrológica única ya que su estructura cambia rápidamente en el tiempo (Álvarez-Yépiz et al., 2008). Por lo tanto, para comprender los procesos de regeneración de estos bosques durante la sucesión es importante evaluar los patrones de flujo de agua en el continuo suelo-planta-atmósfera.

Este estudio tiene como objetivo determinar el contenido de agua del suelo a la escala de varios metros cuadrados en un rodal de sucesión temprana de bosque tropical seco dominado por *Acacia cochliacantha* en Alamos, Sonora, y describir la dinámica de la evapotranspiración ecosistema en tres años de monitoreo continuo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El observatorio eco-hidrológico se estableció en un sitio de bosque tropical seco después de 9 años de recuperación tras ser deforestado, dentro del rancho el Guayabo (26°59'56.51" N; 108°47'5.46" W), que forma parte de la Reserva monte Mojino, manejada por Naturaleza y Cultura Internacional y se encuentra dentro del Área Natural Protegida Sierra de Álamos-Río Cuchujaqui. El sitio tiene una precipitación promedio anual de 712 mm y una temperatura promedio anual de 24°C. En este sitio, se recopilaron datos meteorológicos a intervalos de un minuto y se promediaron cada media hora excepto la precipitación (PPT), la cual fue acumulada. La PPT se midió con un pluviómetro de balancín (TE525-L, Texas Electronics Inc.), la radiación neta con un radiómetro de cuatro componentes (CRN 4, Kipp and Zonen). La evapotranspiración real (ET) fue determinada con un sistema de covarianza de vórtices compuesto por un anemómetro sónico para medir la dirección y velocidad del viento en tres dimensiones, para determinar las características de turbulencia en la parcela de aire (WindMaster, Gill Instruments) y un analizador de gases en infrarrojo de vía abierta y respuesta rápida (10 Hz) para determinar la concentración de vapor de agua en una parcela de aire (Li-7500A Li-cor, Inc.) ambos instrumentos fueron sostenidos con una torre de comunicaciones a una altura de 6 m. Más detalles de la metodología de covarianza de vórtices se pueden consultar en Rojas-Robles et al. (2023).

Para asegurar la calidad de los datos y minimizar el error sistemático, los instrumentos fueron calibrados dos o tres veces al año, y para evaluar la confiabilidad de las estimaciones de flujos, consideramos el cierre del balance de energía como la relación entre la suma de flujos escalares (determinados con el sistema de correlación de vórtices) y energía disponible (determinado con el radiómetro neto). El cierre del balance

energético con los datos de medias horas fue de más del 75 % con una subestimación del 25 % para el sitio de estudio en general.

El contenido de agua volumétrico (VWC) a una escala espacial de varias decenas de metros se determinó con un sensor de rayos cósmicos (COSMOS-CRS-1000, Hydroinnova LLC, Albuquerque, NM, EE. UU.), ubicado a 1 m de altura, que registró conteos de neutrones acumulativos a intervalos de una hora. Los conteos de neutrones acumulados fueron transformados a contenido volumétrico de agua (VWC) siguiendo a Franz et al. (2012).

Para esto obtuvimos N_0 (Desilets et al., 2010) con la ecuación 1:

$$N_0 = \frac{N_{corr}}{\left(\frac{0.0808}{\theta_{grav}}\right) + 0.3372}$$

Donde N_0 es la tasa de recuento de neutrones sobre suelo seco (neutrones), N_{corr} es el recuento de neutrones corregido para los factores de influencia atmosférica como lo es la humedad absoluta, y θ_{grav} es el contenido gravimétrico de agua del suelo de un muestreo de campo (cm^3/cm^3) junto con la densidad aparente, en donde se tomaron núcleos a 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, y 27.5 cm de profundidad en transecto alrededor del sensor de rayo cósmicos ubicados al norte ($0^\circ, 60^\circ, 300^\circ$) y sur ($120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$) y a 10, 25 y 80 m de distancia en cada dirección. Con el suelo colectado se estimó la humedad gravimétrica, la humedad asociada al carbono orgánico y el agua látice (Stevanato et al., 2019).

Con el N_0 obtenido, utilizamos la ecuación 2 (Desilets et al., 2010) para obtener VWC_{rc} a partir del conteo de neutrones. Ecuación 2:

$$VWC_{rc} = \left[\left(\frac{0.0808}{\frac{N_{corr}}{N_0} - 0.372} - 0.115 \right) - (lw + soc) \right] * sbd$$

Donde VWC_{rc} es el contenido volumétrico de agua del sensor de rayos cósmicos (cm^3/cm^3), N_{corr} es el recuento de neutrones corregido (neutrones) y N_0 es la tasa de recuento de neutrones sobre suelo seco (neutrones) obtenida de la ecuación 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variabilidad climática intra e interanual en el sitio de estudio permite el análisis de los cambios en el contenido de agua en suelo y sus consecuencias en la evapotranspiración ya que el periodo de estudio incluye un año seco (2017; 580 mm/año) un año promedio (2016; 733 mm/año) y un año con humedad arriba del promedio de largo plazo (2018; 857 mm/año). Mostrando una correspondencia importante en la ET, ya que el flujo ecosistémico acumulado por año fue de 749 mm, 708 mm 822 mm, en 2016, 2017 y 2018, respectivamente. Así mismo, durante el periodo de estudio se identificaron eventos de lluvia importantes fuera de la temporada de crecimiento (i.e. invierno de 2007

y 2008), lo cual ofreció una oportunidad para destacar el potencial de respuesta y sensibilidad del sensor de rayos cósmicos. En la Figura 1 es notable la armonía de las entradas de agua por precipitación y la acumulación de agua en el perfil somero (entre 0 a 30 cm) reportados con el sensor de rayos cósmicos y la evapotranspiración.

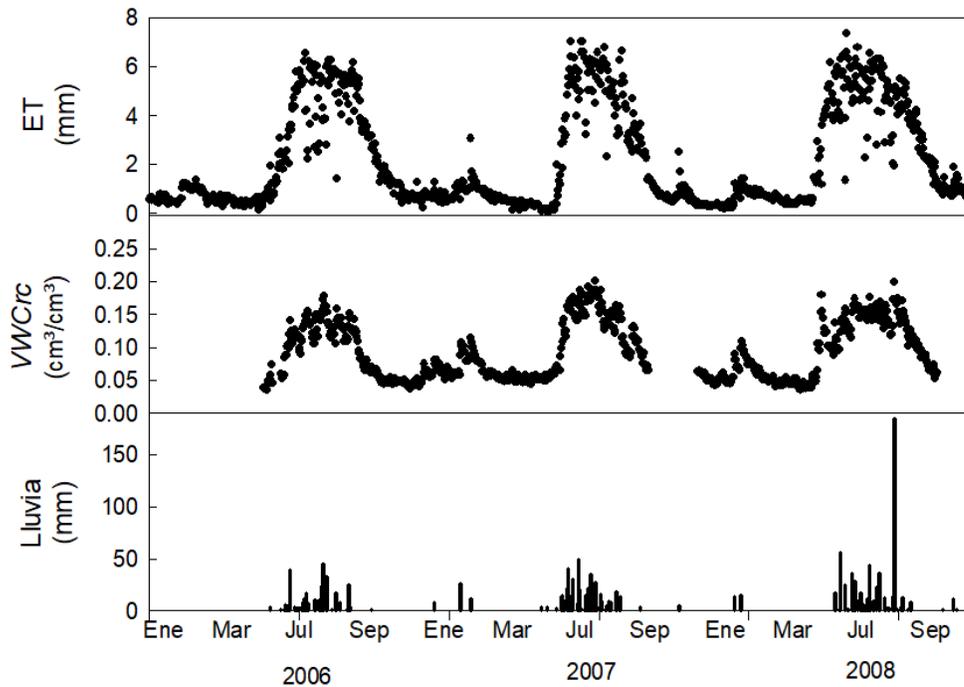


Figura 1. Evapotranspiración real (ET) estimada con la técnica de correlación de vórtices (panel superior), contenido volumétrico (VWCrc) de agua superficial (~0-30 cm) a escala de parcela determinado con un sensor de rayos cósmicos (panel intermedio) y lluvia diaria acumulada en un bosque tropical seco (panel inferior).

En estas series de tiempo es clara la conectividad que existe entre la entrega de agua atmosférica precipitable, la disponibilidad del recurso en el suelo y su transferencia de retorno a la atmosfera por el flujo combinado de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. La resultante de esta conexión sugiere que, en este bosque seco en recuperación, la recarga del agua del suelo sucede en los primeros 30 cm de profundidad, ya que la cantidad de agua que se evapotranspira solo varía entre el -4% y el 22% de la precipitación dependiendo del sí es un año seco, promedio o con precipitaciones excedentes mientras que el contenido volumétrico de agua fluctúa a la par de la entrada de lluvia y la ET.

CONCLUSION

La capacidad de estimar las entradas, acumulaciones y salidas de agua en continuo suelo-planta-atmosfera ofrece una perspectiva funcional para indagar procesos eco-hidrológicos que controlan el funcionamiento de los ecosistemas. Para avanzar en el entendimiento de estos procesos eco-hidrológicos la combinación de metodologías que ofrezcan información sobre las entradas, almacenes y retornos de agua a escalas congruentes es vital.

BIBLOGRAFIA

- Álvarez-Yépez, J. C., Martínez-Yrizar, A., Búrquez, A., & Lindquist, C. (2008). Variation in vegetation structure and soil properties related to land use history of old-growth and secondary tropical dry forests in northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 355-366.
- Desilets, D., Zreda, M., & Ferré, T. P. A. (2010). Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, 46(11).
- Franz, T. E., Zreda, M., Rosolem, R., & Ferré, T. P. A. (2012). Field Validation of a Cosmic-Ray Neutron Sensor Using a Distributed Sensor Network. *Vadose Zone Journal*, 11(4), vzj2012.0046.
- Rojas-Robles, N. E., Yépez, E. A., Álvarez-Yépez, J. C., Sánchez-Mejía, Z. M., Garatuza-Payan, J., & Rivera-Díaz, M. A. (2023). Producción neta del ecosistema durante la sucesión ecológica secundaria: lecciones desde el bosque tropical seco. *Madera y Bosques*, 29(1), e2912368-e2912368.
- Stevanato, L., Baroni, G., Cohen, Y., Lino, F. C., Gatto, S., Lunardon, M., Marinello, F., Moretto, S., & Morselli, L. (2019). A novel cosmic-ray neutron sensor for soil moisture estimation over large areas. *Agriculture*, 9(9).
- Yepez E.A., Williams D.G., (2009). Precipitation pulses and ecosystem carbon and water exchange in arid and semiarid environments. In: De la Barrera E. and Smith W. (eds.) *Biophysical Plant Ecology: Perspectives and Trends*. UNAM.

APLICACIÓN DE CAOLÍN Y COMPUESTO ELICITOR EN PEPINO BAJO CONDICIONES DE MALLA SOMBRA: PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE FRUTO

Jesús Enrique López Avendaño*; Jesús Alfredo Valverde Urías; José Ángel Martínez Gallardo; Mitzi Dayanira Estrada Acosta; Leonardo Román Román; Luis Alfonso Amarillas Bueno.

Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-Eldorado, km 17.5, CP 80000, Culiacán, Sinaloa, México. *profe.jesus@uas.edu.mx

RESUMEN

El cambio climático está ocasionando un incremento en la temperatura promedio del aire y una variabilidad evidente en los patrones de lluvia, provocando severos problemas de sequía e inundaciones; bajo estas condiciones, se espera un impacto negativo en la producción agrícola; por lo que, es relevante buscar y analizar diversas alternativas de optimización del uso de agua por las plantas, sin afectar la calidad y producción agrícola; entre las alternativas que se analizan a nivel mundial está el uso de compuestos antitranspirantes para reducir la pérdida de agua a través de los estomas de las plantas. En este sentido, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto agronómico del uso de dos productos antitranspirantes en el desarrollo, producción y calidad del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de malla sombra. Se desarrolló un trabajo experimental utilizando dos productos comerciales como antitranspirantes, un fertilizante foliar elicitor (FFE) y caolín, con aplicaciones a diferentes concentraciones, el diseño experimental fue de bloques al azar con 5 tratamientos y 4 repeticiones. Se evaluaron: altura de planta, diámetro de tallo, longitud, diámetro y peso del fruto, acidez, sólidos solubles totales, pH, firmeza y conductividad eléctrica; para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey al 5%. Los resultados no muestran diferencia significativa entre tratamientos para ninguna de las variables utilizadas, sin embargo, se observó una gran cantidad de aborto de frutos y frutos amargos en la cosecha.

PALABRAS CLAVE: *Antitranspirantes agrícolas; Clima semiárido; Cucumis sativus; Déficit hídrico; Evapotranspiración.*

INTRODUCCIÓN

Es sabido que las plantas sufren diversos cambios en su metabolismo cuando se altera la proporción de agua que requieren para su subsistencia; por lo que, el abastecimiento necesario de agua a las plantas es uno de los factores clave para su crecimiento, desarrollo y producción, sin embargo, el déficit de este recurso en determinadas etapas de su ciclo vegetativo puede ocasionar estrés hídrico y afectar la producción y calidad de frutos (Meza et al., 2020). De acuerdo con Song et al. (2022), el futuro de la productividad agrícola y la seguridad alimentaria estará determinado por sequías cada vez más frecuentes y severas, así como algunos otros factores abióticos causantes de estrés en los cultivos; en este sentido, juegan un papel importante las sustancias o compuestos

antitranspirantes para reducir la transpiración y garantizar la producción aún en situaciones extremas como la falta de agua y reducir sus efectos. El estrés abiótico, como el déficit de agua, conduce a una serie de cambios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y moleculares en las plantas que afectan de manera adversa el crecimiento, producción y calidad de cosecha en los cultivos agrícolas.

Los bajos almacenamientos de recursos hidráulicos tanto superficiales como subterráneos, debido a la frecuencia y severidad de las sequías en Sinaloa, al igual que en otras regiones del planeta, son muy evidentes (Ravelo et al., 2014); por lo que, es importante conocer el efecto que ocasionaría los períodos largos de falta de agua en el desarrollo, producción y calidad de los cultivos, particularmente del cultivo de pepino (*Cucumis sativus*), considerando su importancia comercial para los productores agrícolas del Valle de Culiacán. En este trabajo se propone evaluar el efecto agronómico del uso de dos productos antitranspirantes en el desarrollo, producción y calidad del cultivo de pepino bajo condiciones de malla sombra, cuando se somete a períodos de déficit de agua durante su ciclo vegetativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se desarrolló en las instalaciones de la Facultad de Agronomía situada en el Valle de Culiacán al noroeste de México, con coordenadas 24°37.4' LN y 107°26.7' LO. El clima en la zona es semiárido cálido con una temperatura media mensual entre 19.2 y 30°C, alcanzando una temperatura máxima de 43°C en julio y mínima de 0.6°C en febrero; la precipitación media anual es de 690 mm con una temporada de lluvias que abarca desde julio hasta septiembre, concentrándose en este período el 79% de la precipitación anual, la temporada más seca es de febrero a mayo con una precipitación concentrada del 1.3%. El suelo es de textura arcillosa con un 59% de arcilla, 29% de arena y 12% de limo, el contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo es de 0.481 cm³ cm⁻³, mientras que, a punto de marchitez permanente es de 0.348 cm³ cm⁻³, lo que genera una humedad totalmente aprovechable de 0.133 cm³ cm⁻³, la densidad aparente es de 1.17 g cm⁻³.

El período de estudio comprendió un ciclo vegetativo de 77 días después del trasplante, desde el 22 de febrero hasta el 09 de mayo del 2022. Se instaló una torre meteorológica para medir temperatura del aire, humedad relativa, presión barométrica y flujo de calor en el suelo. El riego se hizo por goteo en tiempo real aplicando la lámina de agua diaria estimada con el método FAO56 bajo condiciones estándar, el volumen de agua aplicado se midió con un medidor digital volumétrico Dorot®; el contenido de humedad en el suelo se determinó con un sensor TDR (Time Domain Reflectometer) Campbell Scientific®. Para someter al cultivo a estrés hídrico por falta de agua, se permitió que se consumiera el 50% de la humedad totalmente aprovechable, considerando que la FAO recomienda que el abatimiento de la humedad aprovechable debe ser del 30% para condiciones de clima cálido y seco.

Se implementó un diseño experimental de bloques al azar con 5 tratamientos y 4 repeticiones. La superficie del lote experimental fue de 86 m², se utilizaron 4 surcos de 12.5 m de largo y 0.6 m de ancho con una separación de 1.5 m entre surcos, la separación de plantas fue de 0.5 m, se trasplantaron 25 plantas por surco, por lo que, cada unidad experimental consistió en 5 plantas por repetición, analizándose un total de 100 plantas. Se utilizaron dos productos comerciales como antitranspirantes, un fertilizante foliar Elicitor (FFE) con compuestos bioactivos de extracto vegetal (Juniperus-agroenzimas[®]) y caolín, con aplicaciones a diferente concentración.

Los tratamientos fueron: T1-Caolín 30 g L⁻¹, T2-FFE 3 ml L⁻¹, T3-Caolín 15 g L⁻¹, T4-FFE 1.5 ml L⁻¹ y T5-Testigo (sin aplicación). Se realizaron dos aplicaciones para los tratamientos señalados: a los 50 días y 55 días después del transplante (ddt) durante la etapa de máximo desarrollo del cultivo, ya que en esta etapa la transpiración es el factor dominante del proceso de evapotranspiración. Para evaluar el efecto sobre el crecimiento de la planta, se midieron altura y grosor del tallo a los 59, 66 y 74 días ddt; para evaluar el efecto sobre las variables que afectan el rendimiento del cultivo, se midió el diámetro, longitud y peso del fruto, para ello se realizaron 6 cortes después de la aplicación de los tratamientos a los 57, 63, 65, 68, 72 y 77 ddt. Para evaluar la calidad de frutos, se consideraron las variables: contenido de sólidos solubles totales (°Brix), firmeza, pH, conductividad eléctrica (CE) y acidez titulable de frutos. Para el análisis estadístico de los resultados se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cuanto a la altura y grosor del tallo, no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los 5 tratamientos; la menor altura media se alcanzó en el tratamiento testigo para las tres mediciones (254.5, 275.5 y 293.5 cm, respectivamente), mientras que la mayor altura promedio fue para las plantas con el T3 Caolín 15 g L⁻¹ (259.3, 280.4, 296.4 cm, respectivamente). Sin embargo, en cuanto al grosor del tallo, el valor medio mayor fue para el tratamiento testigo (T5) (11.3, 11.5 y 11.7 mm, para las tres mediciones respectivamente), y el menor grosor fue para el T3 con 9.7, 10.1 y 10.3 mm, respectivamente); lo que muestra que, las plantas del T3 presentaron una mayor elongación lo que provocó una reducción del diámetro, y caso contrario ocurrió con las plantas del T5. Brito et al. (2019) señalan que el uso del caolín forma una película sobre las hojas, lo que causa una obstrucción de los estomas reduciendo la transpiración, sin embargo, también el proceso fotosintético es afectado y las plantas al reconocer una menor incidencia de radiación fotosintéticamente activa, tienden a crecer (elongación), lo que explicaría el mayor crecimiento de las plantas y el menor diámetro del tallo, con los tratamientos T1 y T3 obtenidos en este trabajo. Por otro lado, Ashrafunnesa et al. (2018) al evaluar crecimiento y rendimiento de chile bell bajo diferentes condiciones de producción y el uso foliar de caolín y regulador de crecimiento, considerando los tratamientos sin regulador de crecimiento, obtuvieron una mayor altura de plantas al aplicar caolín en condiciones de malla sombra.

Respecto a las variables relacionadas con el rendimiento (diámetro, longitud y peso del fruto), el análisis de varianza y prueba de Tukey muestran que no existe diferencia significativa entre las medias de los diferentes tratamientos para las tres variables consideradas; el diámetro mayor de fruto registrado fue de 53.4 mm para el T3, mientras que, el diámetro menor fue de 51.3 mm para el T1. Respecto a la longitud, el T2 presentó una mayor longitud con 28.5 cm, y el T1 presentó la menor longitud con 27.8 cm; asimismo, el fruto con el T2 obtuvo un mayor peso con 501.2 g, mientras que, en el T1 el peso promedio del fruto fue de 466.7 g.

Para el caso del rendimiento, el tratamiento con mayor resultado fue el T3 con 23.02 t ha⁻¹, mientras que, el rendimiento más bajo se obtuvo con el T4 con 20.64 t ha⁻¹, sin embargo, aunque el ANOVA y la prueba de Tukey indican que no existe diferencia significativa entre los tratamientos, la diferencia entre el mayor y menor tratamiento es de 10.3%. Monge y Loría (2022) evaluaron el rendimiento y calidad de chile dulce en Costa Rica al aplicar diferentes tratamientos con caolín en forma foliar y no encontraron diferencias significativas en el número de frutos por planta, peso y rendimiento, similar a los reportado en este trabajo. Sin embargo, Ashrafunnesa et al. (2018) reportan un mayor rendimiento en chile bell al aplicar caolín de manera foliar bajo condiciones de malla sombra con respecto al tratamiento testigo. La literatura reporta resultados erráticos en el efecto de caolín sobre el rendimiento de cultivos, mientras que algunos autores registran incrementos en la producción (Djurovic et al., 2016; Dinis et al., 2017), otros reportan que no existe diferencia entre el testigo y el tratamiento con caolín (Cosíe et al., 2015; Cantürk y Kunter, 2021).

Respecto a las variables relacionadas con la calidad de frutos, el ANOVA y la prueba de Tukey indican que no existió diferencia significativa entre las medias de los diferentes tratamientos de cada una de las variables. El contenido de azúcar en el fruto varió desde 5.8 °Brix en T4 y T5, hasta 6.1 °Brix en T1; la firmeza del fruto tuvo una variación desde 86.5 Newton (N) en T2 hasta 91.1 N en T3; por otro lado, la conductividad eléctrica en el fruto, tuvo una variación desde 184.6 $\mu\text{s cm}^{-1}$ en T1 hasta 194.1 $\mu\text{s cm}^{-1}$ en T4. Tanto para el pH como para la acidez titulable del fruto el valor medio para los diferentes tratamientos se mantuvo igual, correspondiendo un valor de 5.7 para pH y 0.3 g 100 ml⁻¹, para la acidez titulable. Abdallah (2019) al aplicar caolín y pinolina en forma foliar en tomate para conocer su efecto en el crecimiento y rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico, encontraron que la aplicación de los antitranspirantes por sí mismos no tuvieron un efecto significativo en las variables de acidez titulable, sólidos solubles totales y en el rendimiento total, similar a lo obtenido en el presente trabajo.

En cuanto al uso de elicitores, aunque en la presente investigación no hubo diferencia significativa entre los tratamientos aplicando el fertilizante foliar elicitor (FFE) y el tratamiento control, otras investigaciones señalan lo contrario, tal es el caso de Rivas et al. (2021) quien determinó que el uso de compuestos elicitores como el quitosano afectó positivamente las variables que afectan el rendimiento; asimismo, Jiménez et al. (2018) al evaluar la respuesta agronómica de chile pimienta a la aplicación de compuesto elicitor,

concluyó con una respuesta positiva de la aplicación de este compuesto sobre diferentes variables y rendimiento final.

CONCLUSIONES

La aplicación de caolín y FFE de manera foliar no generó ninguna diferencia significativa en el crecimiento, calidad y rendimiento del cultivo. Sin embargo, la aplicación de caolín en dosis de 1.5 g L⁻¹, produjo un ligero incremento de 2.3% con respecto al testigo y de 11.5% respecto al rendimiento más bajo. Aunque la aplicación de FFE produjo frutos de mayor longitud y diámetro (T2), el rendimiento fue inferior debido a un menor número de frutos por planta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdallah, A. (2019). Impacts of kaolin and pinoline foliar application on growth, yield and water use efficiency of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) grown under water deficit: A comparative study. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18, 256-268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2017.08.001>
- Ashrafunnesa, A., Akter, S., Monir, M.R., Kabir, M.H. 2018. Growth and yield response of bell pepper (*Capsicum annum*) to the application of kaolin and 4-CPA under net protected condition. *Journal of Experimental Biosciences*, 9(1), 9-16.
- Brito, C., Dini, L.T., Moutinho-Pereira, J., Correia, C. (2019). Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance. *Scientia Horticulturae*, 250, 310-316. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.070>
- Cantürk, S. y Kunter, B. (2021). Effects of kaolin particle film treatment on table grape characteristics of cv. Trakya Ilkeren (*V. vinifera* L.). *KSU Journal of Agriculture and Nature*, 24(3): 522-528. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdogavi.745100>
- Cosié, M., Djurovié, N., Todorovié, M., Maletí, R., Recevié, B., Stricevié, R. (2015). Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of sweet pepper. *Agricultural Water Management*, 159:139-147. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.014>
- Dinis, L.T., Malheiro, A.C., Luzio, A., Fraga, H., Ferreira, H., Goncalves, I., Pinto, G., Correia, C.M., Moutinho-Pereira, J. (2017). Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: water relations, photosynthesis and oxidative damage. *Photosynthetica*, 5, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0714-3>
- Djurovic, N., Cosic, M., Stricevic, R., Savic, S., Domazet, M. (2016). Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of tomato. *Scientia Horticulturae*, 201: 271-278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.017>
- Jiménez-Arteaga, M.C., González-Gómez, L.G., Suárez-Benítez, M., Paz-Martínez, I., Oliva-Lahera, A., Falcón-Rodríguez, A. (2018). Respuesta agronómica del pimiento California wonder a la aplicación de Quitomax. *Revista Centro Agrícola*, 45(2), 40-46. ISSN on line: 2072-2001.
- Meza, K., Ruales, B., Manguashca, J., Rivadeneira, J.L. (2020). Caracterización espectral del estrés hídrico en el cultivo de pepino dulce (*Solanum muricatum*). *Revista Geoespacial*, 17(1), 14-24. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1492>
- Monge-Pérez, J.E. y Loría-Coto, M. (2022). Aplicación foliar de caolinita y *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis en Chile Dulce (*Capsicum annum* L.). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 26, 121-133. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.09>

Ravelo, A.C., Sanz-Ramos, R. y Douriet-Cárdenas, J.C. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia*, 31(1), 11-24. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v31.n1.9836>

Rivas-García, T., González-Gómez, L.G., Boicet-Fabré, T., Jiménez-Arteaga, M.C., Falcón-Rodríguez, A.B., Terrero-Soler, J.C. (2021). Respuesta agronómica de dos variables de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación del bioestimulante com quitosano. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-9, e796. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.796>

Song, C.; Rong, Y.; Liu, R.; Oxley, L.; Ma, H. (2022). Testing the Effects of Water-Saving Technologies Adapted to Drought: Empirical Evidence from the Huang-Huai-Hai Region in China. *Land*, 11, 2136. <https://doi.org/10.3390/land11122136>

CALENDARIO AGRÍCOLA: ENTRE LA FIESTA Y LA CULTURA DEL CULTIVO

Moisés Vázquez Cercas

Dirección Ejecutiva de la Zona Patrimonio Mundial, Natural y Cultural de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. Dirección: Av. Año de Juárez 9700, Col. Quirino Mendoza, San Luis Tlaxialtemalco, Alcaldía Xochimilco, C. P. 16610, Ciudad de México, México. *moisesvacerca@gmail.com

RESUMEN

La Zona Patrimonio Mundial, Natural y Cultural de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, posee una extensión importante de suelo cultivable. Aquí, como en otras localidades rurales, el calendario agrícola cristaliza la conexión entre festividades y actividades que sustentan el ciclo del cultivo. A pesar su vinculación con la dinámica urbana de la Ciudad de México, esta región ha mantenido el arraigo a sus tradiciones a través de la celebración de los ciclos naturales. Las festividades agrícolas marcan momentos cruciales en el ciclo de cultivo, desde la siembra hasta la cosecha, que se reflejan en las actividades en el suelo. Comienzan con rituales relacionados con la fertilidad del suelo y la importancia de la colaboración comunitaria, de los que depende la abundancia de las cosechas; a medida que las plantas crecen, las festividades reflejan el desarrollo natural de los cultivos y la comunidad se involucra en el cuidado y mantenimiento de los campos. Después de la cosecha se agradece al suelo y se procura su protección durante la época de frío. A menudo, las actividades se acompañan de expresiones culinarias y artísticas diversas que fortalecen lazos entre la comunidad. Las tradiciones se transmiten de generación en generación, conectando profundamente las prácticas en el suelo de cultivo con la herencia cultural. Así, el calendario agrícola, más que una herramienta para regular actividades es un símbolo de identidad cultural arraigada, simbiosis entre festividades y cultura del cultivo, un testimonio del profundo respeto por el suelo que sustenta a estas comunidades.

PALABRAS CLAVE: *Ciclo; Festividades; Siembra; Suelo; Zona patrimonio.*

INTRODUCCIÓN

El calendario agrícola representa una integración única entre las festividades y la cultura del cultivo, así como una sólida conexión con las características del suelo agrícola (Pozo, 2015). A lo largo de la historia este calendario ha sido fundamental no sólo para regular las actividades del cultivo y mantener las características del suelo, sino que también desempeña un papel crucial en el arraigo de las tradiciones culturales. Las festividades agrícolas se entrelazan de manera significativa con los momentos clave en el ciclo de cultivo, pero también están intrínsecamente vinculadas al suelo que sustenta estas comunidades. Las festividades de preparación para la siembra marcan el inicio del proceso agrícola, donde las personas de los pueblos y barrios se reúnen para honrar a santos y deidades relacionados con la fertilidad, pidiendo la protección del suelo que sustenta sus cultivos para que las futuras cosechas sean fructíferas. A medida que las

siembras crecen y se desarrollan, las festividades evolucionan para reflejar el progreso del ciclo agrícola, para luego dejar descansar el suelo para que se recupere. De esta forma se enfatiza la importancia de cuidar y preservar el suelo, esencial para su sustento, a través de acciones que lo nutren y protegen.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Zona Patrimonio Mundial Natural y Cultural de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta (ZPMNCH-XTMA) de la Ciudad de México, se realizan una gran cantidad de actividades culturales, de cuidado del cultivo, que ejemplifican cómo se fusionan lo simbólico e identitario con el ciclo de la producción de plantas cultivadas, como elementos intrínsecos de la relación existente entre la tierra y la cultura de los pueblos (Torres et al., 2017). Los ritos relacionados con la naturaleza están ligados con el ciclo agrícola, es decir, con las distintas etapas de crecimiento de los productos destinados a la alimentación, principalmente con la milpa. Si bien la religión católica impuso sus propios santos y festividades, éstos se hicieron coincidir con los ritos indígenas originales para que fuera más fácil que los adoptaran y, al mismo tiempo, se lograran las cosechas. Otra posibilidad es que, una vez establecidos los santos patronos en las comunidades, los indígenas los festejaron a su manera incluyendo elementos agrícolas.

Las celebraciones reflejan el tránsito de las etapas del cultivo a lo largo del ciclo agrícola. Varias festividades que se realizan en la ZPMNCH-XTMA, coinciden con el calendario agrícola. Generalmente inician en una primera etapa con la preparación del suelo de cultivo, después de la fiesta de Los Reyes en Tláhuac, el 6 de enero, y en las semanas previas a la celebración del Día de la Candelaria, el 2 de febrero, fecha en que se realiza bendición de las semillas que se sembrarán, incluyendo maíz, frijol, calabaza, tomate, chayotes, entre otras. A partir de entonces se planea la parcela y se prepara el suelo de acuerdo con las características que necesitará cada cultivo. Se barbecha y mueve el suelo, y se añaden abonos que mejoran su pH y nutrición. En las chinampas se aprovechan los lodos del fondo de los canales, altamente nutritivos, para formar almácigos tradicionales conocidos como chapines. Hacia el 3 de mayo, fecha en la que se honra a la Santa Cruz, se da inicio a las siembras. Las plántulas emergen y empiezan a crecer y pronto el suelo se escarda para quitar las hierbas que no se desean y, en el caso del maíz, se apoquinan montones de tierra alrededor de las matas cuando estas ya alcanzan entre 20 y 30 cm de altura, unos dos meses después de la siembra. A veces también se añaden nutrientes, mientras se trata de proteger la humedad del suelo de los intensos rayos del sol en lo que llegan las lluvias, lo que ocurre hacia fines del primer semestre del año y coincide con el día de San Juan Ixtayopan, el 24 de junio. A partir de entonces inicia un segundo momento en el calendario.

Las fiestas de La Magdalena y de Santa Ana, el 22 y 26 de julio, respectivamente, guardan relación con las lluvias. El suelo continúa con cuidados más relacionados con el ciclo del agua. Hacia el 15 de agosto se celebra la Asunción de María, periodo que coincide con que las lluvias comienzan a tener su mayor apogeo. La cosecha viene en septiembre; al terminarla cada parcela realiza -en fechas variables- una ceremonia conocida como “el

combate”, en la que se queman cuetes después de recoger las últimas mazorcas y se canta a la virgen o santo patrono de cada pueblo. Para el 1 y 2 de noviembre concluye el tiempo de la cosecha con la celebración del día de muertos, que coincide con la conmemoración católica del Día de Todos los Santos y los Fieles Difuntos. La celebración del Día de Muertos es considerada la fiesta más emotiva de México (SADER, 2021) y coincide, además, con otras fiestas en el mundo relacionadas con el fin de la cosecha y el recuerdo de los ancestros.

Como se observa, las actividades agrícolas no necesariamente se llevan a cabo justo el día correspondiente a la festividad de la religión dominante; sin embargo, la proximidad de las fechas funciona muy bien como referencia de las distintas etapas y es importante para la planeación de la vida cultural de los pueblos (Torres et al., 2017). Además, como se ha visto que ocurre en otras localidades, las personas campesinas van ajustando las fechas y tipos de trabajos del cultivo en función de los fenómenos meteorológicos que ocurren en cada ciclo. Así, aquí también se observa una dicotomía entre el tiempo meteorológico, el tiempo ritual y el tiempo de labor agrícola (Cruz López, 2011). Por otro lado, algunas de las fiestas se concibieron como movibles desde su inicio, incluso para la religión católica, por ejemplo, las relacionadas con la Cuaresma, que dependen de las fases lunares y en su origen están vinculadas con el mantenimiento de la fertilidad de la tierra: desde la fiesta del barrio de Xaltocan, en Xochimilco, dos domingos antes del Miércoles de Ceniza, hasta el Jueves de Corpus, todas coinciden con los procesos de la temporada de secas hasta el inicio de las lluvias. Es interesante notar que la mayoría de las fiestas patronales, en cambio, coinciden con el apogeo de las lluvias.

Además, la visión de un manejo integral del paisaje se ha hecho presente también en los calendarios agrícola y ritual. Entre las comunidades del suelo de conservación del que es parte la ZPMNCH-XTMA, los cerros han sido muy venerados, frecuentemente se instalan cruces en las cimas, que se visitan y celebran el ya mencionado 3 de mayo, durante la temporada de secas. Algunos relatos nos han dado cuenta de los vínculos que se establecían en estos momentos del año entre los pueblos de la montaña con los del valle. Tal es el caso de la correspondencia entre Santa Cruz Acalpíxca y San Bartolomé Xicomulco, pueblos que, según la memoria oral, todavía a principios del siglo XX, tenían la costumbre de intercambiar insumos tan importantes como el agua que emergía de los manantiales al pie de los cerros de Acalpíxca, por madera de los montes de San Bartolomé (Torres et al., 2017).

CONCLUSIONES

En conclusión, el calendario agrícola no solo representa una rica tradición relacionada con los ciclos de la naturaleza, también resalta la importancia de las labores de conservación del suelo y el paisaje como fundamento de la vida agrícola. Muchas de las prácticas tradicionales son una muestra de cómo las técnicas del pasado pueden coexistir armoniosamente con las de los tiempos presentes, si bien requieren cierto grado de adaptación a los desafíos modernos (Pozo et al., 2016). Estas actividades sociales y culturales demuestran que al mantener vigente nuestra relación con algunos ciclos de la

naturaleza, se generan procesos vivos con las personas (Torres et al., 2017). Más que sólo regular las labores agrícolas, este calendario y las tradiciones culturales que marca, desempeña un papel crucial en la conservación y mantenimiento del suelo agrícola y el legado cultural que se protege y conserva en la ZPMNCH-XTMA.

BIBLIOGRAFÍA

Cruz López, M. (2011). Comparación del ciclo agrícola actual con el de hace unos diez años en San Juan Jalpa, municipio de San Felipe del Progreso, Estado de México: evidencia de adaptación al cambio climático. *Ra Ximhai: Revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sustentable*, Universidad Indígena de México, México, 7(1):95-106.

Pozo, A. G. (2015). Componentes de un paisaje cultural extenso: el caso de Xochimilco-Tlahuac-Milpa Alta al sur de la Ciudad de México. In *Gestión del patrimonio: Entre la conciencia crítica y la cohesión social* Servicio de Publicaciones, México, 218 págs.

Pozo, A. G., Ensástiga, E., Sánchez, F. R. C., y Varas, N. R. (2016). Las chinampas: patrimonio mundial de la Ciudad de México. *PATRIMONIO: Economía Cultural y Educación para la Paz*, Editorial MEC-EDUPAZ, 1(11): 158-190.

SADER [Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural] (01 de noviembre de 2021). Día de Muertos, la fiesta más emotiva de México. Blog de la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, Gobierno de México. Disponible en: <https://bit.ly/diademuertossader>, recuperado el 23 de agosto de 2023.

Torres, M.A., Soto-Cortés, T., Gardida-Degollado, I. (2017). *Las Fiestas del Pueblo. Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac*. Editorial Sociedad de Experimentación, México. (128 págs.).

CARTOGRAFÍA DIGITAL DE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SAHUAYO

Mitzi del Rosario Lupián-Machuca*; Gustavo Cruz-Cárdenas

Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-IPN-Michoacán, Justo Sierra 28, Col. Centro. 59510 Jiquilpan, Michoacán, México. *mlupianm2100@alumno.ipn.mx

RESUMEN

La infiltración forma parte de los servicios ecosistémicos de regulación y es el proceso en el cual el agua de la superficie entra al suelo. Es importante para la gestión ambiental y agrícola. La variabilidad espacial y temporal de la infiltración es particular de cada suelo, así como de los usos al que sea destinado. El objetivo fue realizar la predicción espacial de la infiltración de agua en el suelo en la subcuenca del río Sahuayo con algoritmos de aprendizaje automatizado. Se realizaron pruebas de infiltración con un infiltrómetro de doble anillo en 60 puntos distribuidos aleatoriamente en el área de estudio. En cada punto se tomaron muestras de suelo y se realizaron determinaciones de materia orgánica, textura y densidad aparente. Se obtuvo información de temperatura, precipitación y evaporación de 60 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, atributos geográficos del Continuo de Elevaciones Mexicano, así como datos de sensores remotos del satélite Sentinel-2. Para la predicción de infiltración se utilizaron los algoritmos de bosques aleatorios (RF), máquinas de soporte vectorial (SVM) y redes neuronales artificiales (ANN); en su configuración por defecto y realizando el ajuste de sus hiperparámetros. Se evaluó su poder predictivo mediante los valores de error cuadrático medio (RMSE) y error medio absoluto (MAE). La mejor precisión se obtuvo con el algoritmo ANN (RMSE= 1.04 y MAE=0.89) en su configuración por defecto y con el ajuste de los hiperparámetros.

PALABRAS CLAVE: *Parametrización; Propiedades de suelos; Variación espacial*

INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos del suelo están principalmente influenciados por su uso y gestión (Adhikari & Hartemink, 2016), y dependen de las propiedades del suelo y su interacción. Entre los servicios de regulación que proporciona el suelo se encuentra la infiltración; uno de los procesos más importantes de la superficie terrestre pues tiene un rol fundamental en la hidrología, pedología, hidrogeología, irrigación y sistemas de drenaje (Panahi et al., 2021). Conocer la cantidad y la variación espacial es importante para la gestión ambiental y de cuencas (Panahi et al., 2021).

Es posible estimar la variación espacial de propiedades hidráulicas como la infiltración, a través de ligar propiedades de suelo con variables ambientales utilizando la cartografía digital de suelos (McBratney et al., 2003). Numerosos estudios han adoptado el modelo SCORPAN como marco conceptual para predecir propiedades y clases de suelos (Grunwald, 2009).

Referente a la infiltración, Rahmati (2017) compara la regresión lineal multivariada (MLR) y redes neuronales artificiales (ANN) para desarrollar funciones de pedotransferencia para predecir la infiltración acumulada, Cortes-D et al. (2018) realizaron predicción espacial de la infiltración usando geoestadística, y Pahlavan-Rad et al. (2020) probaron dos modelos para predecir la variación espacial de la infiltración de agua en el suelo.

Otro punto importante a considerar al trabajar con algoritmos de aprendizaje automatizado es la estrategia de ajuste de parámetros, y su impacto en el rendimiento de cada algoritmo (Wadoux et al., 2020).

El objetivo fue realizar la predicción espacial de la infiltración de agua en el suelo en la subcuenca del río Sahuayo con algoritmos de aprendizaje automatizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la subcuenca del río Sahuayo, que se localiza entre las coordenadas 102°29' y 102° 54' longitud oeste, 19°49' y 20°10' latitud norte. De acuerdo con la WRB, los suelos estudiados se clasifican como Luvisol, Vertisol y Leptosol.

Se seleccionaron 60 puntos de manera aleatoria. En cada punto se determinó la infiltración con un infiltrómetro de doble anillo. Se tomaron las lecturas a los tiempos de 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 15.0, 30.0, 45.0, 60 y 90 minutos. Con la información recolectada se calculó la tasa de infiltración media ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) para cada punto.

La tasa de infiltración básica (f_p , $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), se definió como el promedio de la tasa de infiltración de las últimas tres mediciones (Yáñez-Díaz et al., 2019) y se calculó de acuerdo a Zhang et al. (2017).

En laboratorio se determinaron las propiedades de densidad aparente materia orgánica y textura de acuerdo con la metodología de NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, 2002).

Los factores de suelo y clima se obtuvieron por medio de geoestadística. Que consiste en tres pasos: análisis exploratorio, análisis estructural e interpolación kriging. Para el factor vegetación, se calcularon los NDVI, a partir de datos del satélite Sentinel-2 (*European Space Agency*, 2023). Para el factor relieve se utilizó el continuo de elevaciones mexicano de INEGI (INEGI, 2021).

Se hizo una filtración de los predictores originales (factores del modelo SCORPAN) por el método regsubset (Lumley, 2020). Se partitionaron los puntos de muestreo en 70% para entrenar y 30% para validar los modelos. Se aplicó el remuestreo de validación cruzada con 10 repeticiones y 10 submuestras. Los algoritmos utilizados fueron bosques aleatorios, máquinas de soporte vectorial y redes neuronales artificiales; con su configuración por defecto e incluyendo el ajuste de sus hiperparámetros. La evaluación del poder predictivo se realizó mediante los valores del error cuadrático medio (RMSE) y error medio absoluto (MAE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores mínimos y máximos de la infiltración fueron de 25.33 $[\text{mm}\cdot\text{h}]^{-1}$ y 20125 $[\text{mm}\cdot\text{h}]^{-1}$, respectivamente, con una media de 1269.54 $[\text{mm}\cdot\text{h}]^{-1}$. Los Luvisoles cumplen con las características que de acuerdo con la literatura favorecen la infiltración (Maderey, 2005; Navarro & Navarro, 2013); sin embargo, no es la combinación con mayor capacidad de infiltración.

En este caso, el Leptosol es el que proporciona mayor capacidad de infiltración. Es el segundo con mayor contenido de materia orgánica, para el cuál, la vegetación juega un papel fundamental, siendo bosques de encino la vegetación predominante.

Las variables de materia orgánica y precipitación se normalizaron con la función logaritmo. Las variables arcilla, arena, materia orgánica, precipitación y temperatura mínima se ajustaron con el modelo exponencial; densidad aparente y evaporación con el modelo gaussiano y temperatura máxima con el modelo lineal. Existen varios parámetros que determinan el ajuste del semivariograma experimental con los modelos teóricos, tales como, tamaño de muestra y tipo de muestreo (Estrada-Godoy et al., 2023). Las variables de materia orgánica y arena se ajustaron a gaussiano y exponencial, respectivamente, lo cual coincide con los resultados de Shahinzadeh et al. (2022).

Se utilizó kriging ordinario para la interpolación de todas las 28nfiltraes de suelo y clima por ser el de menor error (Cuadro 1). Para arcilla y materia orgánica se obtuvieron errores de 0.06 y 0.1 mayores, respectivamente, que lo reportado por Đurđević et al. (2019) y Hammam (2022). Mientras que para la variable arena, se obtuvo un error 0.35 menor que lo encontrado por Hammam (2022).

Se aplicaron los algoritmos de redes neuronales artificiales (ANN), bosques aleatorios (RF) y máquinas de soporte vectorial (SVM); todos con la configuración por defecto y se evaluó la precisión de los modelos generados. La mejor precisión se obtuvo con el algoritmo ANN (RMSE= 1.04 y MAE=0.89) en su configuración por defecto y con el ajuste de los hiperparámetros (Cuadro 1).

El ajuste de los hiperparámetros de los algoritmos ha ayudado a disminuir el error en propiedades de suelo como arena, arcilla y pH, no así para materia orgánica (Deiss et al., 2020); con lo cual se observa que, los resultados pueden o no ser satisfactorios dependiendo de la propiedad, como es el caso de la infiltración, donde el ajuste no disminuyó el error.

Cuadro 1. Errores de los algoritmos de aprendizaje automatizado.

| Configuración | Algoritmo | RMSE | MAE |
|---------------|-----------|-------|-------|
| PD | RF | 1.307 | 1.120 |
| PA | RF | 1.289 | 1.091 |
| PD | SVM | 1.058 | 0.855 |
| PA | SVM | 1.185 | 0.927 |
| PD | ANN | 1.048 | 0.891 |
| PA | ANN | 1.048 | 0.891 |

PD: Por defecto; PA: Con ajuste de hiperparámetros; RF: Bosques aleatorios; SVM: Máquinas de soporte vectorial; ANN: Redes neuronales artificiales; RMSE: Error cuadrático medio; MAE: Error medio absoluto

CONCLUSIONES

El mejor algoritmo para realizar predicción espacial de la infiltración de agua en el suelo en la subcuenca del río Sahuayo es redes neuronales artificiales, en su configuración por defecto y con ajuste de hiperparámetros.

BIBLIOGRAFÍA

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*, 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Cortes-D, D. L., Camacho-Tamayo, J. H., & Giraldo, R. (2018). Spatial prediction of soil infiltration using functional geostatistics. *AUC Geographica*, 53(2), 149–155. <https://doi.org/10.14712/23361980.2018.15>
- Deiss, L., Margenot, A. J., Culman, S. W., & Demyan, M. S. (2020). Tuning support vector machines regression models improves prediction accuracy of soil properties in MIR spectroscopy. *Geoderma*, 365(January 2020), 114227. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114227>
- Đurđević, B., Jug, I., Jug, D., Bogunović, I., Vukadinović, V., Stipešević, B., & Brozović, B. (2019). Spatial variability of soil organic matter content in Eastern Croatia assessed using different interpolation methods. *International Agrophysics*, 33(1), 31–39. <https://doi.org/10.31545/intagr/104372>
- Estrada-Godoy, F., Cruz-Cárdenas, G., Ochoa-Estrada, S., & Silva, J. T. (2023). Cartografía digital de suelos con regresión-Kriging y datos de sensores remotos. *Revista Terra Latinoamericana*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1617>
- European Space Agency. (2023). Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Grunwald, S. (2009). Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma*, 152(3–4), 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.003>
- Hammam, A. M. (2022). Spatial Variability of Soil Properties Using R Language. *Malaysian Journal of Soil Science*, 26(26), 17–26.
- INEGI. (2021). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Lumley, T. (2020). Regression Subset Selection. Package “Leaps.” <https://cran.r-project.org/web/packages/leaps/leaps.pdf>

- Maderey, L. E. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudios del ciclo hidrológico. (1st ed.). [https://books.google.com.mx/books?id=0S3XDWsDzSAC&pg=PA57&dq=capacidad+de+infiltracion&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi_iOzD-cH1AhWImWoFHREVC3IQ6AF6BAgGEAI#v=onepage&q=capacidad de 30nfiltración&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=0S3XDWsDzSAC&pg=PA57&dq=capacidad+de+infiltracion&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi_iOzD-cH1AhWImWoFHREVC3IQ6AF6BAgGEAI#v=onepage&q=capacidad+de+infiltracion&f=false)
- McBratney, A., Mendonca Santos, M. ., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(2003), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Navarro, G., & Navarro, S. (2013). Química agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. Ediciones Mundi-Prensa. [https://books.google.com.mx/books?id=RSs6AgAAQBAJ&pg=PA150&dq=capacidad+de+infiltracion+tipo+de+suelo&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiR-vPe88r1AhWHJ0QIHV9JAjEQ6AF6BAgEEAI#v=onepage&q=capacidad de 30nfiltración tipo de suelo&f=true](https://books.google.com.mx/books?id=RSs6AgAAQBAJ&pg=PA150&dq=capacidad+de+infiltracion+tipo+de+suelo&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiR-vPe88r1AhWHJ0QIHV9JAjEQ6AF6BAgEEAI#v=onepage&q=capacidad+de+infiltracion+tipo+de+suelo&f=true)
- Pahlavan-Rad, M. R., Dahmardeh, K., Hadizadeh, M., Keykha, G., Mohammadnia, N., Gangali, M., Keikha, M., Davatgar, N., & Brungard, C. (2020). Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. *Catena*, 194(May), 104715. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715>
- Panahi, M., Khosravi, K., Ahmad, S., Panahi, S., Heddam, S., Melesse, A. M., Omidvar, E., & Lee, C. W. (2021). Cumulative infiltration and infiltration rate prediction using optimized deep learning algorithms: A study in Western Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35(April), 100825. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100825>
- Rahmati, M. (2017). Reliable and accurate point-based prediction of cumulative infiltration using soil readily available characteristics: A comparison between GMDH, ANN, and MLR. *Journal of Hydrology*, 551, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.046>
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Pub. L. No. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis., Diario Oficial de la Federación (2002). http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002
- Shahinzadeh, N., Babaeinejad, T., Mohsenifar, K., & Ghanavati, N. (2022). Spatial variability of soil properties determined by the interpolation methods in the agricultural lands. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4897-4907. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01402-w>
- Wadoux, A. M. J. C., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions. *Earth-Science Reviews*, 210(January), 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., & Sánchez-Castillo, L. (2019). Effects of land use change and seasonal variation in the hydrophysical properties in Vertisols in northeastern Mexico. *Soil Use and Management*, 35(3), 378-387. <https://doi.org/10.1111/sum.12500>
- Zhang, J., Lei, T., Qu, L., Chen, P., Gao, X., Chen, C., Yuan, L., Zhang, M., & Su, G. (2017). Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology*, 552, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.032>

COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES ESPECTRALES Y FACTORES EDÁFICOS EN AMBIENTES DE RIBERA EN UNA SUBCUENCA DEL ALTO BALSAS

Jael Ponce Casañas*; Juan Manuel Valderrábano Gómez; Gerardo Cruz Flores; Alma Bella López López

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Batalla 5 de mayor S/N, esquina Fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, CP 09230, Alcaldía Iztapalapa Ciudad de México, México. *yael.poncesita@gmail.com

RESUMEN

La calidad ambiental del Alto Balsas ha sido afectada por su alta concentración poblacional y es importante evaluarla con el uso de indicadores. Esta investigación se planteó dos objetivos generales: 1) Comparar los índices NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y EVI (Índice de Vegetación Mejorado) para establecer el más adecuado en el estudio de la vegetación ribereña; 2) conocer, mediante un análisis de componentes principales (ACP), los indicadores edáficos de sistemas ribereños para establecer su relación con el NDVI y el EVI. La subcuenca se delimitó en un sistema de información geográfica (SIG), mediante un modelo hidrológico. Para los parámetros edáficos: Conductividad eléctrica (CE), pH activo, densidad aparente (DA), materia orgánica y carbono orgánico del suelo (MOS y COS), nitrógeno total (Nt) y relación carbono/nitrógeno (C/N), se buscó información en tesis sobre sistemas ribereños dentro de la subcuenca, estructurando una base de datos georreferenciada procesada posteriormente en un ACP, para identificar los datos de mayor variabilidad y establecer los indicadores. Los índices NDVI y EVI se obtuvieron de imágenes de satélite Landsat 8 OLI-TIRS en un SIG. Los indicadores edáficos obtenidos con el ACP fueron el COS (CP1), pH activo (CP2) y Nt (CP3), representando el 92.6% de la varianza acumulada. El sitio Zoquititla presentó valores altos de NDVI (0.68) y EVI (0.21), relacionándose con un contenido de COS alto (8.29%), pH activo de 5.23 (medianamente ácido) y Nt bajo (0.26%), mientras que San Rafael Tlanalapa tuvo valores muy bajos de NDVI (0.34) y EVI (0.11), así como COS muy bajo (1.21%), pH activo de 6.09 (Neutro) y Nt bajo (0.04%).

PALABRAS CLAVE: *Componentes principales; Indicadores edáficos; Sistemas de información geográfica; Vigor.*

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Alto Balsas concentra el 70.6% de la población total de la cuenca del Balsas, lo que ha ocasionado un impacto negativo sobre la calidad del recurso hídrico y de los ecosistemas distribuidos en la cuenca (Handal et al., 2017). Valencia (2015) indicó que existen fuertes procesos de erosión generados por la combinación de intensas precipitaciones y una severa deforestación, generando la alteración de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, así como la pérdida de la biodiversidad de sus ecosistemas, entre ellos la vegetación ribereña. Por sus atributos ecológicos, los ecosistemas de ribera son identificados como elementos valiosos de los sistemas fluviales,

dada su estrecha relación con la calidad del agua, que a su vez dependen de los atributos edáficos desarrollados en sus márgenes: densidad aparente, disponibilidad de nutrientes, materia orgánica del suelo, acidez, conductividad eléctrica, actividad enzimática, contenido de carbono y nitrógeno en biomasa microbiana; además del carbono orgánico del suelo, considerado como uno de los indicadores más importantes por su relación con otras propiedades de los ecosistemas (Trujillo et al., 2018). Con el avance de la tecnología, la teledetección constituye una herramienta esencial para analizar la dinámica de la vegetación, al poner a disposición datos por satélite de distintos atributos de los ecosistemas terrestres, entre ellos el NDVI y el EVI (García, 2015), que aportan medidas cuantitativas que miden la actividad fotosintética (vigor vegetal) y son ampliamente utilizados para estudiar los cambios de cobertura y uso de suelo (Cortés et al., 2014). Por lo anterior, el presente estudio pretende conocer cuál de los índices espectrales tiene mejor eficiencia y relación con los indicadores edáficos, bajo el supuesto de que los valores más altos de NDVI y EVI se relacionarán positivamente con los contenidos de COS.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica en la vertiente oriental de la Sierra Nevada; presenta un clima templado semifrío/frío con suelos tipo Phaeozems, Cambisols, Andosols, Arenosols, Leptosols y Regosols (INEGI, 1998; Geoportal CONABIO, 2021). En la región se reconocen zonas de bosques, matorrales, agricultura, pastizales y pradera de alta montaña (Rzedowski, 1986). La subcuenca se delimitó en un SIG con un modelo hidrológico (Castro, 2017), a partir de modelos de elevación digital (MED) tipo terreno con resolución de 5m, obtenidos de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El modelo hidrológico incluyó el método Strahler para obtener la red de drenaje y el orden de los escurrimientos. Posteriormente, mediante una búsqueda en tesis realizadas en sistemas ribereños en el Laboratorio de Edafología y Nutrición vegetal, de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, se estructuró una base de datos georreferenciada con factores edáficos que han sido identificados como indicadores de calidad de suelos (CE, pH activo, DA, MOS, COS, Nt y relación C/N). Para obtener el NDVI y EVI, se descargaron imágenes del Sensor Landsat 8 OLI-TIRS de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con fechas próximas a las de los muestreos edáficos. A estas imágenes se les realizó una corrección radiométrica, atmosférica y topográfica (Andino y Ochoa, 2016) para finalmente, con el software SAGA obtener el NDVI y EVI (Lillesand et al., 2015). Los indicadores edáficos se identificaron con un análisis de componentes principales (ACP), modelo que según Balzarini et al., (2011), reduce la dimensionalidad del universo de variables con base en la varianza y los denomina componentes principales (CP). Así, el primer componente principal (CP1) explicó la mayor parte de la variación total (Córdoba et al., 2012). Los CP se identificaron con base en los eigenvalores (autovalores) mayores a 1 y para ubicar e identificar las variables de mayor peso en cada CP (CP1, CP2... CPn) se localizó al valor absoluto más alto de cada eigenvector (autovector), lo cual permitió ubicar al parámetro edáfico correspondiente que se estableció como indicador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el cuadro 1 se encontró que cinco de siete sitios se ubican en escurrimientos de orden 1; es decir, nacen en las cabeceras de las cuencas (Mantilla et al., 1998); a su vez la distancia de los sitios a los afluentes oscila entre 8 y 76 m. De acuerdo a Barton et al., (1985), la distancia mínima aceptable para el buen funcionamiento ripario es de 30 m; sin embargo, si se requiere una mayor oferta de beneficios significativos son necesarios desde 100 m. Del ACP (Figura 1), los tres eigenvalores mayores a 1 representaron 92.64% de la varianza acumulada, de los cuales solo el primero representó 43.06%. Así, con el valor absoluto más alto del eigenvector, los parámetros edáficos identificados como indicadores fueron (Cuadro 2): CP1 el COS (0.56), CP2 pH activo (0.66) y CP3 el Nt (-0.61).

En los sitios de estudio, el porcentaje de COS fue de 1.21 a 8.29, es decir, suelos con clases de muy bajo (<2.32) a muy alto (6.38 - 9.28) porcentaje para suelos volcánicos según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Del pH activo, Suastegui (2009) reportó para la parte oriental del Parque Nacional Izta-Popo valores de 5.1 a 6.1 (suelos de tendencia ácida).

En el caso del Nt, para suelos volcánicos un porcentaje menor de 0.30 se considera bajo y valores de 0.30 a 0.80% medio. El sitio con mayor contenido de Nt se estableció en la escala de contenido medio de acuerdo con la NOM-021-RECNAT -2000 (SEMARNAT, 2002).

Cuadro 1. Indicadores edáficos. Datos ordenados ascendentemente de acuerdo con el COS. Los subíndices corresponden a la clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000. N = neutro; MAC = medianamente ácido; FAC = fuertemente ácido; MB = muy bajo; B = bajo; M = medio; A = alto.

| No. Sitio | Sitio | pH | COS | Nt | NDVI | EVI | Orden de los ríos | Dist. Río m |
|-----------|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------|
| 1 | Zoquititla | 5.23 _{MAC} | 8.29 _A | 0.26 _B | 0.6898 _{MA} | 0.2158 _{MA} | 1 | 18.50 |
| 2 | Apatlaco | 4.65 _{FAC} | 4.47 _A | 0.34 _M | 0.3497 _B | 0.0996 _B | 1 | 59.02 |
| 3 | Atzomaco | 5.21 _{MAC} | 4.29 _M | 0.11 _B | 0.6527 _A | 0.2009 _A | 2 | 8.50 |
| 4 | Río Apol | 4.73 _{FAC} | 4.17 _M | 0.44 _M | 0.6181 _A | 0.2147 _A | 5 | 21.06 |
| 5 | Santa Rita Tlahuapan | 4.47 _{FAC} | 3.68 _M | 0.17 _B | 0.5906 _A | 0.1958 _A | 1 | 9.89 |
| 6 | Izoalco | 5.31 _{MAC} | 1.83 _{MB} | 0.17 _B | 0.4903 _M | 0.1438 _M | 1 | 43.55 |
| 7 | San Rafael Tlanalapa | 6.09 _N | 1.21 _{MB} | 0.04 _B | 0.3453 _B | 0.1135 _B | 1 y 2 | 76.05 |

Cuadro 2. Eigenvectores del Análisis de Componentes Principales de las propiedades edáficas

| | <i>Componente 1</i> | <i>Componente 2</i> | <i>Componente 3</i> |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| Densidad aparente (g cm ⁻¹) | -0.4830 | 0.3335 | -0.1255 |
| pH activo | -0.0636 | 0.6602 | -0.1366 |
| CE (dS m ⁻¹) | 0.0360 | 0.4450 | -0.5242 |
| MOS (%) | 0.5637 | 0.1191 | -0.0894 |
| COS (%) | 0.5638 | 0.1184 | -0.0899 |
| Nt (%) | 0.1850 | -0.3068 | -0.6150 |
| C/N | 0.3021 | 0.3637 | 0.5443 |

Para los índices espectrales, el EVI tuvo valores más bajos que el NDVI, pero con la misma tendencia y proporción en ambos índices en cada sitio estudiado; comportamiento observado en estudios donde reportan que el NDVI se satura en áreas altamente vegetadas, razón por la que se desarrolló el EVI, quien tiene más sensibilidad en estas condiciones al incorporar la banda azul y corregir los efectos del suelo, lo que explica los valores más bajos respecto al NDVI (Matsushita et al., 2007).

Según Silva (2014), para evaluar el vigor vegetal, el índice más adecuado es el EVI ya que tiene mayor correlación linear con el área foliar, tipo de cubierta y es menos propenso a la saturación en los bosques, además de ser mínimamente sensible a la contaminación residual de los aerosoles. Finalmente, se encontró que los valores de NDVI y EVI son altos en sitios donde el COS es mayor y donde los suelos son medianamente ácidos.

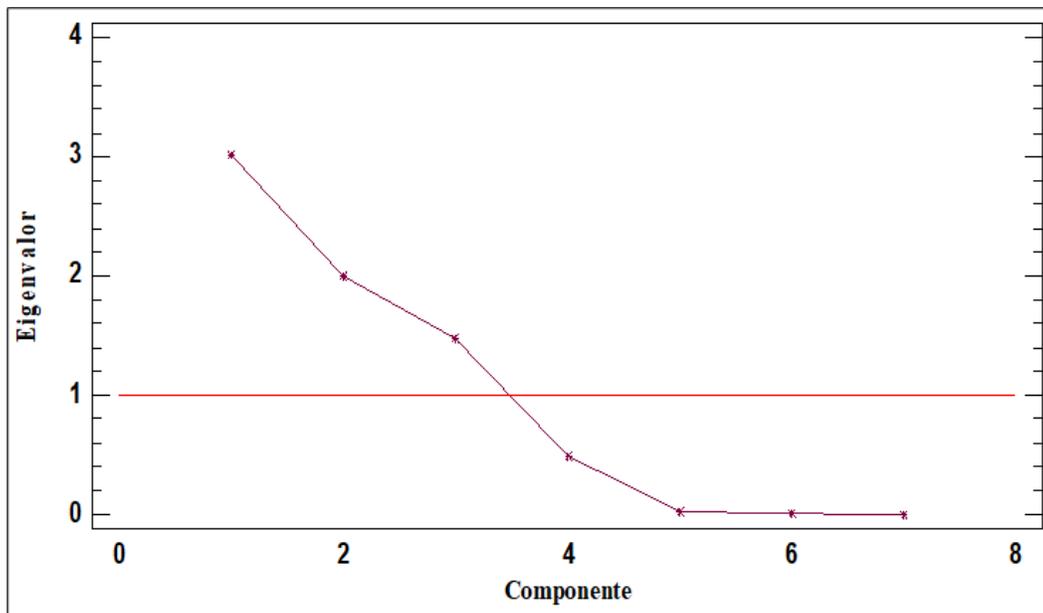


Figura 1. Eigenvalores mayores a 1

CONCLUSIONES

Con el ACP se pudieron establecer al COS, pH activo y Nt como indicadores edáficos.

El EVI representa el índice espectral más adecuado para áreas con coberturas vegetales densamente pobladas. El EVI, NDVI y ACP son herramientas eficientes, con alto potencial para evaluar la relación entre parámetros edáficos y biofísicos, mismos que con mayor número de sitios permitirían proponer un modelo estadístico para estimar datos en donde aún no se hecho trabajo de campo y laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

- Andino, E. y Ochoa, L. (2016). Cálculo de reflectancia de imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *Revista Ciencias Espaciales*, volumen 9, Numero 1 Primavera.
- Balzarini, M., Teich, I., Bruno, C. y Peña, A. (2011). Making genetic biodiversity measurable: a review of statistical multivariate methods to study variability at gene level. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 43(1): 261-275.
- Barton, R., Taylor, D. y Biette, M. (1985). Dimensions of riparian buffer strips required to maintain trout habita in southern Ontario streams. *North Am. J. Fish. Manage.* 5, 364-378
- Castro, B. (2017). Obtención de una cuenca hidrográfica mediante el uso de un software comercial "ArcGIS" y el uso de un software libre "SAGA". Caso de estudio municipio de Portesito, Antioquia. Programa de especialización en Geomática. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada.
- Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M., y Costa, L. (2012). Análisis de componentes principales con datos georreferenciados: Una aplicación en agricultura de precisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo, 44(1), 27-39.
- Cortés, L., Hernández, J., Valencia, D., y Corvalán, P. (2014). Estimation of Above Ground Forest Biomass Using Landsat ETM+, Aster GDEM and Lidar. *Forest Research Open Access*, 3(2), 1-7
- García, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Madrid, España.
- Handal, A., Pérez, G., Morán, L. y García, W. (2017). Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, 3(9), 10-23
- INEGI. (1998). Mapa de suelos de la República Mexicana, escala 1:400,000. Portal de geoinformación 2021 CONABIO
- Lillensad, T., Kiefer, R. y Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretación*. 7th ed., USA: WILEY.
- Mantilla, R., Mesa, O. y Poveda, G. (1998). Geometría, topología y morfometría de las cuencas Magdalena-Cauca y Atrato a partir de modelos digitales de terreno. XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Cali, 155-172.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y. y Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High Density Cypress Forest. *Sensors (Basel)*. Nov; 7(11): 2636-2651.
- Rzedowski, J. (1986). Las plantas calcícolas (incluyendo una gipsófito) del Valle de México y sus ligas con la erosión edáfica. *Biotropica*, 12-15

SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021- RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México.

Trujillo, J., Mahecha, J. y Torres, M. (2018). El recurso suelo: un análisis de sus funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, RIAA: 9(2)*. Universidad de los Llanos, Campus Barcelona Villavicencio, Colombia.

Valencia, J. (2015). Desarrollo de la región hidrológica del balsas mediante la modificación de su veda. *Tecnología y ciencias del agua, 6(1):81-97*

Silva, A. (2014). Analysis of vegetation dynamics using time-series vegetation index data from Earth Observation Satellites. (Tese de Doutoramento). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Brasil

Suastegui, E., (2009). Contribución de la actividad de la ureasa a la liberación de nitrógeno en suelo de uso Agrícola y forestal. FES Zaragoza, UNAM, México. D. F.

EL MAPA DE SUELOS DE CAMPECHE: LA INFORMACIÓN EDAFOLÓGICA EN TU SMARTPHONE

Ángeles Gallegos¹; José Armando Duran^{1,2}; David Palma³; Joel Zavala³; Antonio López³;
Oscar Álvarez²; Francisco Bautista^{2,3*}.

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México;

²Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, Michoacán, México; ³Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. * leptosol@ciga.unam.mx

RESUMEN

Para contrarrestar los problemas globales de los suelos, se requiere plantear alternativas que ayuden a conservar este recurso. Para ello, el mapeo de suelos contribuye con datos científicos, útiles para implementar usos sustentables. En este trabajo se diseñó y desarrolló una aplicación para teléfonos inteligentes (app) con información edafológica, dirigido a diferentes usuarios de los suelos del estado de Campeche, México. Para la elaboración de la app se utilizó la metodología en cascada, este proceso cuenta con una estructura secuencial, cada etapa que se inicia debe de terminarse para comenzar con otra. En las primeras etapas se trabajó con la funcionalidad de la aplicación y desarrollo de interfaces gráficas usando Balsamiq, posteriormente se diseñó una lista de los principales perfiles de suelo del estado de Campeche mostrando la imagen, nombre y descripción del perfil de suelo y su clasificación tanto WRB 2007 y Maya; para su desarrollo se utilizó java como lenguaje de programación. Los mapas fueron convertidos a formato .kml para su visualización. Las últimas etapas consistieron en la fase de pruebas y en generar el archivo .apk de la aplicación para su publicación en Play Store. La aplicación cuenta con tres tipos de usuarios, a cada uno se le ofrece información específica. El menú de usuario cuenta con siete apartados, para la opción "Suelos" se muestra información clasificada de acuerdo al tipo de usuario que la utilice, con ayuda del GPS, el teléfono ubica al usuario en la posición exacta en que se encuentra. La app de los suelos de Campeche provee información de 14 perfiles de suelos representativos, sus características, distribución geográfica y capacidad agrológica. Esta información puede ser utilizada en tiempo real por usuarios profesionales, alumnos y agricultores, para tomar decisiones sobre usos del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Abonos orgánicos; Luvisol; Cambisol; Vertisol; Aguacate.*

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos es uno de los grandes problemas globales. Los usos de la tierra sin el conocimiento de las propiedades de los suelos es algo común (Brevik et al., 2022), y es por esta razón que los suelos se están degradando.

En términos generales, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) son el conjunto de herramientas y soluciones tecnológicas que hacen posible agilizar, ordenar y procesar la información y las comunicaciones de las personas, empresas y organizaciones en pro de la eficiencia y la agilidad (Andreopoulou, 2012). Una aplicación

de teléfono inteligente puede manejar mapas, imágenes, textos y datos del suelo de manera fácil y rápida.

En México se han desarrollado aplicaciones para dispositivos móviles en base Android que ofrecen información de la distribución espacial de los suelos, por ejemplo, la aplicación 'Clasificación maya de suelos', que permite la visualización de los suelos del estado de Yucatán y la aplicación 'Clasificación de los suelos de Tabasco. Otras apps registran las propiedades de los suelos en campo como 'Soil Calculator Simple' (Skiu, 2016). También se han generado apps fuera del país para la clasificación de suelos, como lo son 'Suelos CR', que es una aplicación para la clasificación de los suelos de Costa Rica (Universidad de Costa Rica, 2021); y 'Taxonomía de Suelos', que consiste en una aplicación de aprendizaje del sistema de clasificación de suelos Soil Taxonomy (EduSuelos, 2019).

El objetivo de este trabajo fue el diseño y desarrollo de una aplicación para teléfonos inteligentes con la información edafológica destinada al uso de profesionales, agricultores y estudiantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

La aplicación para teléfonos inteligentes se desarrolló para mostrar información de los suelos del estado de Campeche, México. Esta entidad está ubicada en el sureste mexicano, tiene una superficie de 57 507 km², siendo el estado 17 entre los más poblados de México (Palma-López et al., 2017). El desarrollo de la aplicación se basa en la información de los suelos publicada por Palma-López et al. (2012) y Palma-López et al. (2017).

Para el desarrollo de la aplicación se utilizó la metodología en cascada, la cual consiste de cinco etapas, de las cuales se tomaron en cuenta las primeras cuatro: análisis de requisitos, diseño y codificación, pruebas, e instalación. Esta metodología cuenta con una estructura secuencial, en la que cada etapa que se inicia debe de completarse para comenzar con una nueva (Stsepanets, 2023).

En el análisis de requerimientos se estableció la funcionalidad de la aplicación con un equipo de trabajo que incluyó ingenieros en sistemas computacionales, edafólogos y geógrafos. Se generó un documento especial para el análisis de requerimientos, en él se plasmaron los requerimientos funcionales y no funcionales de la aplicación, además de los diagramas de caso de uso para cada requerimiento funcional.

Durante el diseño y construcción de la aplicación móvil, se esbozaron las pantallas principales con la ayuda del programa Balsamiq para el desarrollo de interfaces gráficas. La primera pantalla consistió en el menú de inicio, en la cual se muestran tres perfiles de usuario: profesional, agricultor y estudiante. La segunda pantalla fue la principal de usuario con su respectivo menú y sus diferentes apartados: información, suelos, unidades de suelo, clases de suelo, mapas, ayuda y clasificación. Posteriormente, se diseñaron los apartados de cada opción del menú de usuario, empezando por la información, este apartado se diseñó con tres pantallas deslizantes en horizontal mostrando la distribución de suelos, referencias y autores de la aplicación.

Se diseñó una lista de los principales perfiles de suelo del estado de Campeche, además de una pantalla secundaria para mostrar la imagen, nombre y descripción del perfil de suelo. En las unidades (usando el esquema de clasificación de la WRB 2007) y clases de uso del suelo se diseñó la misma interfaz, contando con un mapa, un botón para cambiar el tipo de vista, uno para abrir la leyenda del mapa, otro para acceder a la ubicación y dos botones más para acercar y alejar la vista del mapa.

Para el apartado de mapas, el diseño constó de una pantalla con dos imágenes, una imagen del mapa de unidades de suelos y otra imagen del mapa de clases de suelos, además de contar con una pantalla secundaria para mostrar uno de los mapas, de acuerdo con la selección del usuario. En el apartado de clasificación maya de suelos se diseñaron tres pantallas deslizantes en horizontal que incluyeron esquemas de la clasificación maya. Por último, para el apartado ayuda se diseñó una pantalla deslizante en vertical que muestra la descripción de la función de cada apartado del menú de usuario.

Para las interfaces gráficas de la aplicación móvil se utilizaron íconos premium de la página web Flaticon, además se utilizó el software Adobe Express para diseñar el logo de la aplicación, y los iconos de los perfiles de usuario: profesional, agricultor y estudiante.

Una vez aprobada la estructura visual de la aplicación, se trabajó en la generación de los archivos .kml de las capas de datos espaciales del proyecto, lo cual consistió en la conversión de los archivos shape de los mapas de unidades y clases de suelos al formato .kml, ya que la API de Google maps en Android Studio solo admite archivos .kml o .kmz, que es un comprimido de .kml. Para la conversión de los shapefiles se empleó el software ArcGIS versión 10.5. La conversión de las capas de datos espaciales se realizó desde la caja de herramientas 'ArcToolbox', mediante la utilidad 'Conversion Tools' y la opción "Layer To KML".

Para la etapa de pruebas se utilizó la aplicación móvil en diferentes tipos de dispositivos con versiones de Android 5.1 en adelante, además de una pantalla mayor a cuatro pulgadas; esto con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la aplicación y descartar posibles fallas. Las pruebas que se instrumentaron para verificar y validar la aplicación fueron las de caja negra, que consisten en una técnica para verificar la funcionalidad y rendimiento de la aplicación, probando su funcionamiento en diferentes dispositivos, sin tomar en cuenta el código interno de la aplicación, únicamente centrándose en los requisitos que debe cumplir para brindar un resultado óptimo al usuario final (KeepCoding, 2022). En la etapa de instalación, se generó el archivo .apk de la aplicación móvil para su publicación en Play Store.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación cuenta con tres tipos de usuarios: profesionales, alumnos y agricultores. A cada tipo de usuario se le ofrece información específica. La información más amplia y técnica es para profesionales, para los agricultores la información se brinda en un lenguaje coloquial y para los alumnos se proporciona información intermedia. Desde el menú principal se selecciona el ícono del usuario al que se desea acceder. El menú que se

ubica dentro de los perfiles de usuarios cuenta con siete opciones: la opción “Información” muestra datos importantes sobre la aplicación, tales como la distribución de los suelos en el estado de Campeche, referencias de la información con la que se desarrolló la aplicación, y una lista de los nombres de los autores que conformaron al equipo para la creación de la aplicación.

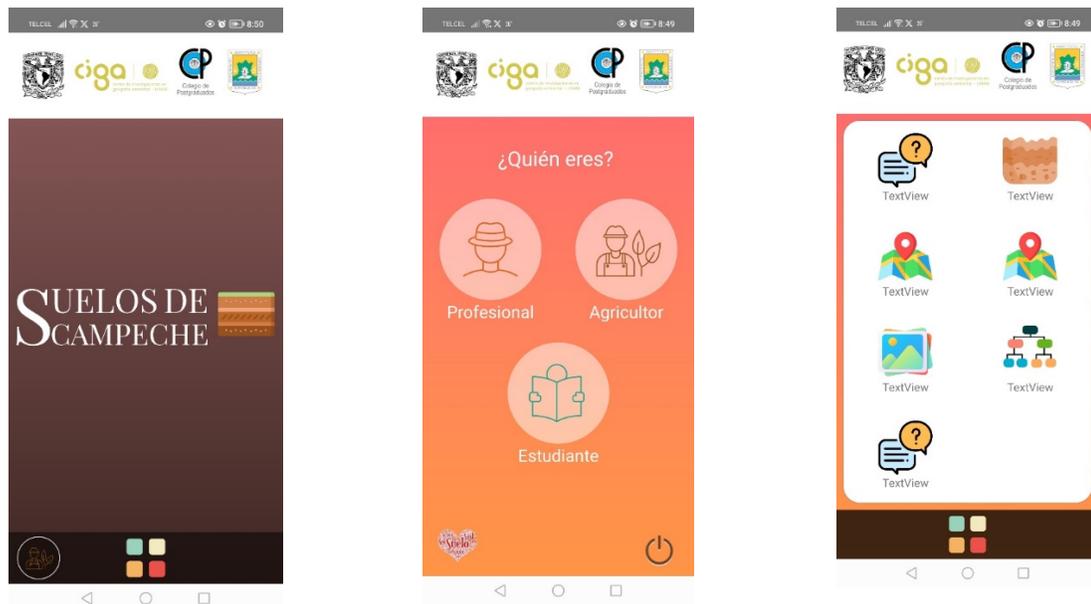


Figura 1. Portada, menú de tipos de usuario y menú de opciones de uso de la app.

En la opción “Suelos” se muestra información clasificada de acuerdo con el tipo de usuario que la utilice, dentro de esta opción se muestra una lista con los 14 principales grupos de suelos de Campeche, además, de su descripción al seleccionar la imagen de un perfil de suelo. La app cuenta con información adicional de acuerdo con el tipo de usuario activo. Para el usuario agricultor y estudiante se despliega un contenedor con una descripción en lenguaje coloquial. Para el usuario profesional se muestran dos opciones, evaluación del sitio y evaluación del perfil de suelo.

La aplicación móvil de los suelos de Campeche detecta la ubicación del usuario en tiempo real, con ayuda del GPS del teléfono ubica al usuario en la posición exacta en que la se encuentra. Una vez obtenida, muestra un marcador en la posición actual (Figura 1). Para acceder a las propiedades de esta función se selecciona el polígono en donde se encuentra el marcador, a través de un rectángulo en el mapa se muestra el nombre de la clase de suelo, FID, y la clase a la que pertenece. También cuenta con el esquema de la clasificación maya de suelos, principalmente de uso entre agricultores de origen maya y para los ingenieros agrónomos que llevan a trabajar a la península de Yucatán.

Algunas limitaciones que presenta la aplicación móvil son: 1) la escala cartográfica de las Unidades de Suelo y Clases de Suelo es 1:250,000 por lo que se trata de información de reconocimiento, en un futuro se plantea complementar esta información con datos a nivel de parcela; 2) la primera vez que se inicie la aplicación debe tenerse acceso a

internet. Probablemente en un futuro, cuando el internet de las cosas sea más utilizado, esta limitación se subsane.

CONCLUSIÓN

La aplicación móvil de los suelos de Campeche provee información espacial (mapas) y puntual (14 perfiles de suelos representativos), ambas características se interpretan desde tres enfoques: a) profesional de la agronomía principalmente aun cuando no es excluyente; para este usuario se despliega la distribución geográfica y capacidad agrológica o capacidad de uso de la tierra; b) agricultor con lenguaje coloquial se dan algunas recomendaciones de uso del suelo, para este perfil se incluye la clasificación maya de suelos; y c) estudiante con un nivel intermedio entre agrónomos y agricultores. La información de la app puede ser utilizada en tiempo real y en la parcela, lo cual permite la toma de decisiones de forma inmediata.

AGRADECIMIENTOS

A la DGAPA UNAM por el financiamiento del proyecto PAPIME PE102222 "El Museo Virtual de Geografía de Suelos de México". Francisco Bautista agradece a la Dirección de General de Apoyo al Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México el financiamiento de la estancia sabática.

BIBLIOGRAFÍA

- Andreopoulou, Z. 2012. Green Informatics: ICT for green and Sustainability. *J. Agric. Inform.* 3, 1-8. <https://doi.org/10.17700/jai.2012.3.2.89>
- Bautista F., A.J. Zinck. 2010. Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 2010, 6:7. <http://www.ethnobiomed.com/content/6/1/7>.
- Bautista F.*, Ma. S. Díaz-Garrido, J.L.M. Castillo-González y A.J. Zinck. 2005. Spatial Heterogeneity of the Soil Cover in the Yucatán Karst: Comparison of Mayan, WRB and Numerical Classifications. *Eurasian Soil Science*. 38(S1): 80-88.
- Brevik, E.C., Hannam, J., Krzic, M., Muggler, C., Uchida, Y. 2022. The importance of soil education to connectivity as a dimension of soil security. *Soil Security*, 7, 100066. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100066>
- Stsepanets (2023). Modelo de cascada (Waterfall): qué es y cuándo conviene usarlo. Recuperado el 17 de febrero de 2023 de. <https://blog.ganttpro.com/es/metodologia-de-cascada/>
- Palma López, D.J., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Morales Garduza, Marcos A., López Castañeda, A., Shirma Torres, Edgar D., Gallegos Trinidad, José Luis. (2012). Estudio sobre el plan de uso sustentable de los suelos del estado de Campeche. SDR.
- Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Morales-Garduza, M. A. (2017). Clasificación y cartografía de suelos del estado de Campeche, México. *Agroproductividad*. 10(12): 71-78.
- KeepCoding, R. (2022, 3 junio). ¿Qué son las pruebas de caja negra? KeepCoding Tech School. Recuperado el 16 de febrero de 2023 de: <https://keepcoding.io/blog/que-son-las-pruebas-de-caja-negra/>
- Skiu. (2016). Clasificación maya de suelos. Recuperado el 17 de febrero de 2023 de: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.skiu.suelos.mayas&hl=es>

Skiu. (2019). Soil Calculator Simple. Recuperado el 17 de febrero de 2023 de:
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.skiu.soilcalculator&hl=es>

Universidad de Costa Rica. (2021). Suelos CR. Recuperado el 17 de febrero de 2023 de:
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.techbitecr.sueloscr&hl=es>

EduSuelos. (2019). Taxonomía de Suelos. Recuperado el 17 de febrero de 2023 de:
<https://play.google.com/store/apps/details?id=ar.edu.unrc.taxonomiasuelos&hl=es>

EL MAPA DE SUELOS DE MICHOACÁN EN TUS MANOS: UNA APP PARA SMARTPHONE

Ángeles Gallegos¹; Carlos Pérez^{1,2}; David J. Palma López³; Francisco Bautista^{1,3*}; Elizeth Ibarra Limas²

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

²Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, Michoacán, México. ³Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. *leptosol@ciga.unam.mx

RESUMEN

El manejo sustentable de los suelos en el ámbito agrícola y ambiental requiere el uso de la información de manera eficiente y expedita. En el estado de Michoacán hay una gran superficie de suelos en proceso de degradación por la apertura del bosque para diferentes cultivos, lo que ha llevado a que desafortunadamente hoy en día no exista bosque ni cultivos, y además los suelos han resultado no aptos para la agricultura. El objetivo de este trabajo fue el diseño y desarrollo de una app para teléfonos inteligentes que brinde información sobre los suelos y sus funciones ambientales para el estado de Michoacán, considerando tres tipos de usuarios: profesional, agricultores y estudiantes. La información edafológica se tomó de artículos científicos publicados y de una tesis doctoral. Se utilizó la metodología en cascada para el desarrollo de la app y se utilizó Balsamiq para las interfaces gráficas, se realizó una lista de los principales perfiles de suelo de Michoacán, incluyendo la imagen, nombre y descripción del perfil de suelo y su clasificación tanto WRB 2007 y los nombres Purépechas. El lenguaje Java se utilizó para la programación. Los shape files de los mapas se pasaron a formato .kml para su visualización en la app. Son tres los tipos de usuarios (profesional, agricultor y estudiante) de la app, cada uno tiene acceso a información específica. El menú de usuario cuenta con cinco opciones, para la opción "Suelos" se muestra información clasificada de acuerdo con el tipo de usuario que la utilice, con ayuda del GPS, el teléfono ubica al usuario en la posición exacta en que se encuentra. La app de los suelos de Michoacán contiene información de 12 perfiles de suelo, sus características, distribución geográfica y las funciones ambientales de los suelos.

PALABRAS CLAVE: *Andosol; Funciones ambientales; Geografía de suelos; Gleysol; Vertisol*

INTRODUCCIÓN

El "Internet de las cosas" tiene como objetivo capturar, generar, analizar y facilitar el acceso a millones de datos en segundos para la mejora de la toma de decisiones (Chamara et al., 2022). El Internet de las cosas también ha llegado a la ciencia del suelo, la agronomía, la conservación ambiental, la conservación de la biodiversidad y la reducción de riesgos ambientales (Talavera et al., 2017).

Las ciencias del suelo no han jugado un papel predominante e influyente en la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales, entre otras razones, debido a la dificultad de comunicación entre los edafólogos y los tomadores de decisiones (agricultores, campesinos, silvicultores, ganaderos, gobernantes, etc.) (Bouma, 2001). Lo

mismo ocurre con profesionales de otras áreas donde se debe considerar la ciencia del suelo, como ambientalistas, hidrólogos, urbanistas, antropólogos, arqueólogos e ingenieros civiles.

La seguridad del suelo “se preocupa por mantener y mejorar los recursos del suelo del mundo para producir alimentos, fibra y agua dulce, mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos y contribuir a la salud humana” (McBratney et al., 2014; Boom y McBratney, 2013). La seguridad del suelo tiene como “objetivo mantener y mejorar los suelos del mundo para producir alimentos, fibras y agua dulce, mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos y contribuir a la salud humana” (McBratney et al., 2014; Brevik et al., 2018).

La conectividad es una de las cinco condiciones de la seguridad del suelo; Consiste en incluir la dimensión social en torno al suelo, es decir, se pretende incluir el conocimiento de los suelos a los propietarios y administradores de la tierra para que el manejo de los suelos se realice de acuerdo con su capacidad (Brevik et al., 2022).

El Internet de las Cosas podría ayudar a lograr parte de los objetivos de seguridad del suelo a través del desarrollo de dispositivos móviles smartphone que permitan al usuario tener un acceso rápido y confiable a la información del suelo en el que se encuentra en un momento dado.

Este trabajo tuvo como objetivo crear la aplicación "Suelos de Michoacán" para brindar un acceso rápido a la información del perfil del suelo específicamente para agricultores, estudiantes y científicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La aplicación “Suelos de Michoacán” se llevó a cabo utilizando la metodología en cascada (Stsepanets, 2023). Esta app tomó la información generada Bedolla-Ochoa et al. (2018); Bautista et al. (2019); Gallegos et al. (2019); y Gallegos et al. (2022).

Se realizó un análisis detallado de los requisitos, identificando las funcionalidades y características del producto final. Con base en esta información, se procedió a diseñar la solución de manera detallada, definiendo la arquitectura, interfaces y componentes necesarios. Posteriormente, se pasó a la implementación del proyecto, donde se llevó a cabo la codificación de la aplicación y se desarrollaron los componentes y funcionalidades de acuerdo con las especificaciones previamente establecidas. A continuación, se realizó la etapa de pruebas y validación, donde se verificó que la aplicación cumpliera con los requisitos establecidos y se corrigieron posibles errores o fallos identificados.

Finalmente, se llevó a cabo la etapa de implementación y puesta en marcha del proyecto, donde se instaló y configuró la aplicación en el entorno de producción.

Para el desempeño de la aplicación “Suelos de Michoacán”, se utilizaron varias herramientas para lograr los objetivos propuestos. Se hizo uso del lenguaje de programación Java y la plataforma de desarrollo Android Studio para crear una aplicación móvil funcional y con una interfaz de usuario intuitiva. Además, se utilizaron

herramientas geoespaciales como Google Earth y ArcGIS para el análisis y visualización de datos geográficos.

Para la creación de diseños y prototipos, se emplearon herramientas como Adobe Express para la edición de imágenes, ArgoUML para la modelización y diseño de diagramas de casos de uso, diagramas de secuencia y diagramas de actividades, y Balsamic para la creación de wireframes y prototipos de interfaz de usuario. Además, se utilizó Flaticon para obtener iconos personalizados que complementaron la apariencia visual de la aplicación.

Se utilizó Android Studio como plataforma de desarrollo, junto con el lenguaje de programación Java para crear una aplicación móvil. Además, se ha incluido una funcionalidad de visualización de los tipos de suelos principales y secundarios del estado de Michoacán a través de archivos KML en un mapa interactivo (Developers, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta aplicación está disponible para su descarga en Google Play, lo que permite a los usuarios de dispositivos Android acceder fácilmente a la información científica de los diferentes tipos de suelos que se encuentran en el estado de Michoacán.

La instalación de la aplicación es muy sencilla. Los usuarios solo necesitan abrir Google Play y buscar la aplicación "Suelos de Michoacán". La aplicación móvil es de descarga gratuita. Una vez que la aplicación ha sido instalada, los usuarios deben seleccionar el tipo de usuario que les corresponde, agricultor, profesional o estudiante (Figura 1). Después, pueden acceder a información detallada sobre los tipos de suelos de Michoacán dando clic al menú suelos que los llevará al conjunto de perfiles de suelos con los que se cuenta. Posteriormente seleccionan un grupo de suelos y desplegará la información correspondiente a ese grupo.

La app incluye información sobre los factores formadores del suelo (relieve, tipos de rocas, climas, y cobertura vegetal o usos de suelo).

La aplicación también cuenta con una funcionalidad de visualizar los tipos de suelos principales y secundarios del estado de Michoacán a través de archivos KML cargados en un mapa interactivo. Los usuarios pueden explorar los tipos suelos del estado y obtener información detallada sobre cada uno de ellos. Esto es especialmente útil para aquellos que están interesados en la agricultura, la ganadería, la construcción o cualquier otro campo que involucre el uso y conocimiento de los suelos. La app cuenta con mapas de los ambientes morfogenéticos a escala 1:500 000 y paisajes geomorfológicos a escala 1:250 000, y de las funciones ambientales de los suelos (Figura 2).

En el estado de Michoacán existe la preocupación por la expansión descontrolada del cultivo del aguacate debido al establecimiento de una gran extensión de huertas que ocupan más de 140 000 ha, donde más de 15 000 huertas se han establecido en suelos no aptos, esto además de daño ecológico es un fracaso como negocio, por lo que nosotros

esperamos que la información edafológica permita una mejor selección de las tierras para su cultivo o para la conservación de la biodiversidad.

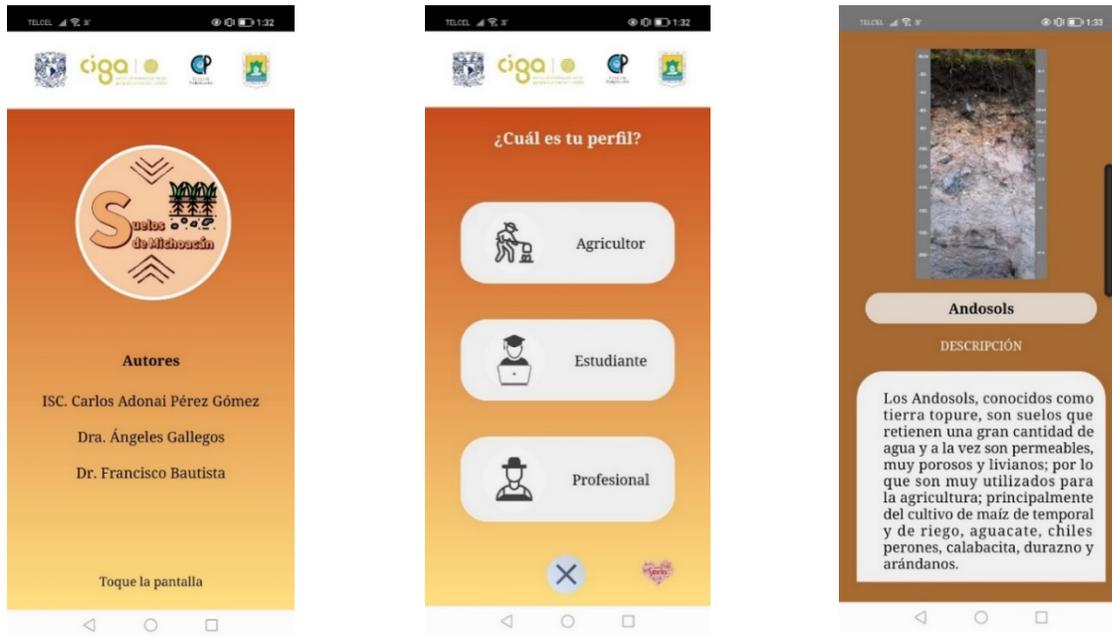


Figura 1. Portada, menú de selección de tipo de usuario y descripción de perfiles

En el estado de Michoacán se han producido grandes desastres del tipo inundaciones y movimientos en masa, ambos han ocasionado grandes pérdidas de infraestructura e incluso algunos decesos por la expansión de las ciudades hacia los Gleysols y hacia los Andosols con altas pendientes, respectivamente. Esta app podría ser de ayuda para una mejor selección de las áreas de expansión urbana.

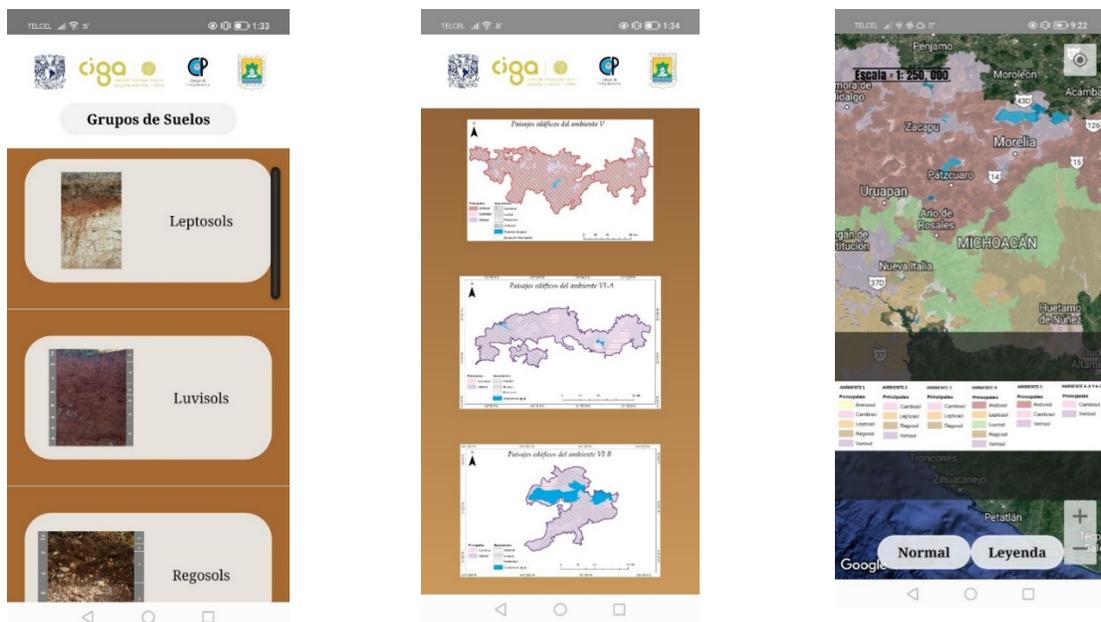


Figura 2. Menú de grupos de suelo, menú de mapas, y mapa del estado de Michoacán

CONCLUSIÓN

La aplicación para teléfonos inteligentes denominada “Suelos de Michoacán” ofrece información técnica sobre el relieve, climas y suelos del estado de Michoacán de manera ágil y rápida.

Tiene la particularidad de que puede aceptar tres tipos de usuario: profesional de la agronomía, agricultor, estudiantes. El agricultor encontrará información espacial del relieve, ambientes morfogenéticos, paisajes geomorfológicos, clima a nivel taxonómico y duración del periodo de lluvia, así como los detalles de los principales perfiles de suelo del sitio en el que se use la app. El agricultor encontrará información con un lenguaje coloquial, se hace uso de los nombres purépechas de los suelos, de amplio uso en el campo michoacano, tipo Charanda, Tupure o Topure, Polvilla, y otras.

Para el usuario estudiante se despliega información intermedia entre la técnica y la campesina.

AGRADECIMIENTOS

A la DGAPA UNAM por el financiamiento del proyecto PAPIME PE102222 "El Museo Virtual de Geografía de Suelos de México". Francisco Bautista agradece a la Dirección de General de Apoyo al Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México el financiamiento de la estancia sabática.

BIBLIOGRAFÍA

- Bautista F., Barajas, A., Alcalá-de Jesús, M. (2019). Peasant knowledge about the soils of the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(3), 369-381.
- Bedolla-Ochoa C., Bautista F., Gallegos-Tavera A. (2018). Funciones ambientales de las clases de tierra campesinas en la reserva de la biosfera Zicuirán-Infiernillo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 24 (3): 265-274
- Boom, J., McBratney, A. (2012). Framing soils as an actor when dealing with wicked environmental problems. *Geoderma*, 200-201, 130-139. DOI 10.1016/j.geoderma.2013.02.011
- Bouma, J. (2001). The new role of soil science in a network society. *Soil Science*, 166 (12), 874-879. DOI 10.1097/00010694-200112000-00002
- Brevik, E.C., Hannam, J., Krzic, M., Muggler, C., Uchida, Y. (2022). The importance of soil education to connectivity as a dimension of soil security. *Soil Security*, 7, 100066. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100066>
- Brevik, E.C., Pereg, L., Steffan, J. J., Burgess, L.C. (2018). Soil ecosystem services and human health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.003>
- Chamara, N., Islam, M, D., Bai, G., Shi, Y., Ge, Y. (2022). Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future. *Agricultural Systems*. 203, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103497>
- Developers, Google Developers. (9 de mayo 2023). Introducción a Android Studio. Android Studio. Recuperado el 3 de junio de 2023 de <https://developer.android.com/studio/intro?hl=es-419>
- Gallegos M.A. (2022). Análisis espacial de las funciones ambientales de los suelos del estado de Michoacán, México. Tesis de Doctorado en Geografía, CIGA, Universidad Nacional Autónoma de México.

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

McBratney, A., Field, D.J., Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 2013, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>

Stsepanets, A. (17 de enero 2023). Modelo de cascada (Waterfall): qué es y cuándo conviene usarlo. Ganttpro. Recuperado el 11 de febrero de 2023 de <https://blog.ganttpro.com/es/metodologia-de-cascada/>

Talavera, J.M., Tobón, L.E., Gómez, J.A., Culman, M.A., Aranda, J.M., Parra, D.T., Quiroz, L.A., Hoyos, A., Garreta, L. E. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 283-297. DOI 10.1016/j.compag.2017.09.015

EL MUSEO VIRTUAL DE GEOGRAFÍA DE SUELOS DE MÉXICO

Francisco Bautista^{1,2*}; Ángeles Gallegos¹; David J. Palma López²; Joel Zavala Cruz²; Aristeo Pacheco³

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701 Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México; ²Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. ³Scientific Knowledge In Use (Skiu), Morelia, Michoacán, México.

*leptosol@ciga.unam.mx

RESUMEN

La enseñanza de las ciencias del suelo, tanto a nivel licenciatura como a nivel de posgrado, no logra sus objetivos de aprendizaje debido, entre otras cosas, a la dificultad de acceso a la información generada. El objetivo fue la generación de un museo virtual de suelos de México, como una herramienta tecnológica que sea de gran utilidad en la enseñanza de los suelos y el autoaprendizaje de la población en general. El diseño y desarrollo de la página web del museo virtual de suelos de México contempló los procedimientos estipulados en la norma mexicana NMX-I-12207-NYCE-2011. El modelo ágil de ciclo de vida seleccionado para el desarrollo de la página web fue Mobile-D. La página web del museo virtual de geografía de suelos de México es: <https://museosuelos.ciga.unam.mx/>. La gran afluencia de visitas en menos de un año es un indicador de éxito. El museo virtual de geografía de suelos de México es un referente mundial en la divulgación de las ciencias del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Distribución espacial de suelos; Divulgación científica; Usos de suelos; TIC*

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de las ciencias del suelo, tanto a nivel licenciatura como a nivel de posgrado, no logra sus objetivos de aprendizaje debido, entre otras cosas, a la dificultad de acceso a la información generada (datos de perfiles en formatos antiguos), sin imágenes, sin datos completos, lenguaje taxonómico muy especializado y sin aplicaciones de uso (Brevik et al., 2022). Esto da como resultado una muy escasa cantidad de profesionales en el área, a pesar de contar con un país edafo-diverso.

Aunado a lo anterior, los alumnos están imposibilitados para ver, en vivo y en directo, la riqueza de perfiles de suelo con la que cuenta el país debido a varios factores, entre los que destacan: a) los costos asociados a viajar por el país, que no todos pueden solventar; y b) la inseguridad que se vive actualmente.

Por otro lado, en los últimos años se ha generado tecnologías (*Google Earth*, modelos digitales del terreno "MDT", imágenes de satélite e imágenes de drones a resoluciones detalladas) que permiten "ver" y navegar por el relieve, la cubierta vegetal y los usos del suelo (Google, 2023; INEGI, 2013; INEGI, 2012); todos ellos factores formadores de los suelos (Zinck, 2012). También, se ha generado información y aplicaciones para teléfonos inteligentes para visualizar fotografías (sitios, perfiles de suelo, rocas, climogramas) y

tablas de datos (perfiles de suelo y factores formadores) sobre el paisaje en sitios georreferenciados (Skiu, 2020; Palma-López et al., 2017a; Palma-López et al., 2017b; Skiu, 2016). Es decir, una gran cantidad de información de suelos generada tanto con sensores remotos a nivel de paisaje y sensores cercanos a nivel de perfil del suelo e incluso horizontes, agregados y partículas (Hartemink y Minasny, 2014). Sin embargo, toda esta información proveniente de las nuevas tecnologías no se ha puesto al servicio de la enseñanza de las ciencias del suelo.

A pesar de los grandes esfuerzos del INEGI por actualizar la información de suelos, con el nuevo esquema internacional de clasificación de suelo mediante la WRB (2015), no ha sido posible contar con una nueva y actualizada base de datos de los perfiles de suelo. Aun cuando llegara a lograrse la actualización de los perfiles de suelo de INEGI con el esquema de la WRB faltaría “traducir” dicha información técnica en información de comprensión por los usuarios de la tierra. Es decir, pasar del lenguaje taxonómico a un lenguaje que pudieran comprender otros profesionales y el público en general.

El objetivo de este trabajo fue la generación de un museo virtual de suelos de México, como una herramienta tecnológica que sea de gran utilidad en la enseñanza de los suelos a niveles de preparatoria, licenciatura y posgrado, así como para el autoaprendizaje de la población en general.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño y desarrollo de la página web del museo virtual de suelos de México contempló los procedimientos estipulados en la norma mexicana NMX-I-12207-NYCE-2011 (NYCE, 2011), este estándar enlista los lineamientos mediante los cuales se debe sostener el desarrollo de software. El modelo ágil de ciclo de vida seleccionado para el desarrollo de la página web fue Mobile-D, que incluye cinco iteraciones a corto plazo: exploración, inicialización, producción, estabilización y pruebas (Abrahamsson et al., 2004).

Las tecnologías, para la arquitectura frontal, que se utilizaron son: a) Angular framework, para crear y mantener aplicaciones web de una sola página; b) Node.js, como entorno en tiempo de ejecución multiplataforma para la capa del servidor; c) JavaScript como lenguaje de programación; d) JQuery para la simplificación de la interacción con los documentos HTML; e) JQuery UI, es una biblioteca de plugins, widgets y efectos visuales para aplicaciones web; f) JQuery Tools, es una biblioteca de componentes que agrega pestañas, acordeones, tooltips, superposiciones, efectos de exposición y scrollables; g) Bootstrap framework, para el diseño web; h) Kendo UI, biblioteca con herramientas de menús dinámicos, gráficas, paneles, rejillas de datos, árboles, ventanas y sistemas upload de archivos; i) Normalize.css, hace que los navegadores procesen todos los elementos de manera más consistente y en línea con los estándares modernos; j) Animate.css, biblioteca de animaciones entre navegadores; k) OpenLayers, biblioteca para mostrar interactivos en los navegadores web; y l) Leaflet, biblioteca para crear aplicaciones de mapeo web. Se utilizó Visual Studio Code como editor de código fuente

(Microsoft, 2023) y Eclipse como entorno de desarrollo integrado (Eclipse Foundation , 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La página web del museo virtual de geografía de suelos de México es: <https://museosuelos.ciga.unam.mx/>. Están en operación las siguientes secciones: “El museo”, “Equipo de trabajo”, “Mapas”, “Bases de datos”, “Vídeos”, “Blogs”, “Para leer”, “Enlaces de interés”, “Imagen del mes” y “Tecnología” (Figura 1).

La sección de vídeos cuenta con la siguiente información: propiedades de los suelos, morfología, génesis y clasificación, ¿para qué sirven los suelos? (funciones ambientales), contaminación de suelos y polvos, inundaciones, agroecosistemas y sus productos, conocimiento campesino (Etnopedología), historia de las ciencias del suelo y razones para estudiar las ciencias del suelo (Figura 2). Hay enlaces a 231 vídeos del canal de YouTube "Suelos, ambiente y algo más". Durante el 2022 se subieron 80 vídeos, de los cuales 22 son para la divulgación de las ciencias del suelo a manera de entrevistas. En este primer año del proyecto el canal tuvo 50,107 reproducciones, 2,400 h de reproducciones de vídeos y ganó 374 suscripciones de un total de 2,052.

La sección blogs consta de los siguientes temas: propiedades de los suelos, morfología, génesis y clasificación, geografía de suelos, ¿para qué sirven los suelos? (funciones ambientales), contaminación por metales pesados, agroclimatología y cambio climático, y consejos, noticias, opinión. Un total de 147 notas de blog, de las cuales 28 se elaboraron en el 2022. En los últimos 12 meses se han leído 925 notas del blog.



Figura 1. Página principal del museo virtual de suelos de México



Figura 2. Lista de temas de los vídeos del museo virtual de geografía de suelos de México

Se han generado mapas edafológicos de cinco estados: Yucatán (cuatro mapas), Campeche (un mapa), Quintana Roo (dos mapas), Tabasco (tres mapas) y Michoacán (un mapa). Mapas sobre consecuencias de la contaminación (diez mapas) y mapas de metales pesados en SLP, CDMX, Mérida, Guadalajara, Ensenada, Mexicali y otros (cinco mapas).



Figura 3. Ubicaciones de los visitantes del museo virtual de geografía de suelos de México

El sitio web del museo virtual de geografía de suelos de México ha recibido 27030 visitas de personas de todo el mundo, destacando EEUU, México, Reino Unido, Bélgica, The Netherlands, Rusia, Australia, China, Japón, Corea y algunos otros países con menor afluencia como España, Francia y países de centro y del sur de América y de África (Figura 3). La gran afluencia de visitas en menos de un año es un indicador de éxito.

CONCLUSIÓN

El museo virtual de geografía de suelos de México es un referente mundial en la divulgación de las ciencias del suelo, se rebasaron las expectativas que consistían en llegar al público mexicano y latinoamericano porque su contenido es en castellano; sin embargo, el museo se ve en todo el mundo, principalmente EEUU, México y Europa, pero se comienzan a tener visitas de Asia y África. El material del museo es utilizado en diversos cursos de edafología a nivel licenciatura dentro y fuera de la Universidad Nacional Autónoma de México, como, por ejemplo, la Universidad Autónoma de Yucatán, la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, el Colegio de Postgraduados en todos sus campus, la Benemérita Universidad de Puebla, y el Instituto Tecnológico de Chiná en Campeche y otras.

AGRADECIMIENTOS

A la DGAPA UNAM por el financiamiento del proyecto PAPIME PE102222 "El Museo Virtual de Geografía de Suelos de México".

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamsson, P., Hanhineva, A., Hulkko, H., Ihme, T.(2004). Mobile-D: an agile approach for mobile application development. Association for Computing Machinery, 174-175.
- Brevik, E.C., Hannam, J., Krzic, M., Muggler, C., Uchida, Y. (2022). The importance of soil education to connectivity as a dimension of soil security. *Soil Security*, 7, 100066.
- Eclipse Foundation, Inc. (2023). Download Eclipse Technology that is right for you. Consultado el 13 de agosto de 2023 en: <https://www.eclipse.org/downloads/>
- Google. (2023). Google Earth. Consultado el 13 de agosto de 2023 en: <https://www.google.com/intl/es-419/earth/>
- Hartemink, A.E., Minasny, B. (2014). Towards digital soil morphometrics. *Geoderma*. 230231, 305-317. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>.
- IUSS Working Group WRB. (2015). World reference base for soil resources. 2015 ed. World Soil Resources Reports No. 106: Rome.
- Normalización y Certificación Electrónica A. C. (NYCE). (2011). NMX-I-12207-NYCE-2011 Tecnología de la información-software-procesos del ciclo de vida del software . México.
- Palma-López, D.J., Jiménez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista, F. (2017^a). Updating the classification of soils in Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12), 29-35.
- Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F. (2017^b). Clasificación y cartografía de suelos del estado de campeche, México. *Agroproductividad*. 10(12), 71-78.
- Skiu. (2016). Clasificación maya de suelos. Consultado el 13 de agosto de 2023 en: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.skiu.suelos.mayas&hl=es>
- Skiu. (2020). Clasificación de los suelos Ta. Consultado el 13 de agosto de 2023 en: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.skiu.tabasco&hl=es>
- Zinck, 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.

FRACCIONAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE UN ENFOQUE DE BALANCE ENERGÉTICO DEL SUELO Y EL DOSEL EN ECOSISTEMAS SEMIÁRIDOS

Gregorio Juárez Cansdales¹; Luis Méndez-Barroso¹; Enrico Yépez-González¹; Agustín Robles-Morúa¹; Hugo Gutiérrez-Jurado²

¹Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de febrero 818, Centro, CP.85000, Ciudad Obregón, Sonora, México; ²Universidad de Texas-El Paso, 500 W. University Ave. El Paso, Texas 79968, Estados Unidos.

RESUMEN

La estimación de evapotranspiración (ET) es muy importante para entender la dinámica hidrológica de los ecosistemas áridos y semiáridos, sobre todo la disponibilidad de este recurso en diferentes etapas fenológicas y su almacenamiento en el suelo y zona vadosa. Hoy en día existen un número limitado de técnicas capaces de cuantificar evaporación del suelo (E) y transpiración (T) aplicables a este tipo de ecosistemas. Sin embargo, el desarrollo de modelos termodinámicos simples ha permitido la estimación de los componentes del balance energético tanto en el suelo como en el dosel de la vegetación. En este trabajo se implementó y evaluó el desempeño del modelo de máxima producción de entropía (MEP) en un ecosistema semiárido para estimar la evolución estacional de los flujos de transpiración del dosel y evaporación del suelo. Los resultados preliminares indicaron que el modelo MEP tuvo un buen desempeño tanto en la estimación de transpiración ($R^2 = 0.86$) como en evapotranspiración ($R^2 = 0.90$) en comparación con observaciones hechas en el sitio. Por lo tanto, este modelo es una alternativa viable para la estimación de partición de ET en sitios de monitoreo a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: *Evaporación; Modelación ambiental; Monzón norteamericano; Transpiración.*

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) es un flujo de suma importancia para entender la dinámica hidrológica de los ecosistemas áridos y semiáridos donde este representa más del 90% del balance hídrico (Wilcox et al., 2003). Un reto importante para entender la producción de biomasa y la dinámica del balance hídrico durante la disponibilidad de agua es mediante la partición de ET es sus dos componentes principales: Transpiración de la vegetación (T) y evaporación del suelo (Newman et al., 2006). Hoy en día existen un número limitado de técnicas capaces de cuantificar E y T que sean aplicables a ecosistemas áridos. Estas técnicas incluyen la integración de modelación matemática con datos de percepción remota (Méndez-Barroso et al., 2014) y medición de isótopos estables de O¹⁸ y deuterio (Yépez et al., 2003). Sin embargo, los modelos numéricos requieren un gran número de variables y las actividades de muestreo de isótopos en campo requieren de gran cantidad de recursos financieros y humanos.

Recientemente se han desarrollado modelos muy precisos basados en el principio termodinámico de máxima producción de entropía (MEP) para estimar los componentes del balance térmico en función de la temperatura superficial, la humedad específica y radiación neta (Wang y Bras, 2011). A pesar de estos avances, su aplicación en ecosistemas caducifolios no ha sido evaluada aún. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es implementar y evaluar el desempeño del modelo MEP en un ecosistema semiárido para estimar la evolución estacional de los flujos de transpiración del dosel y evaporación del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio se estableció dentro de la cuenca del Rio Cuchujaqui, ubicado en el municipio de Álamos, Sonora (27.02 N, 108.78 O, Figura 1). El sistema MEP se instaló en una parcela de 16 m² donde la especie arbórea dominante es *Acacia cochliacantha*. Dentro de la parcela se instalaron dos radiómetros netos (Kipp & Zonen NR1) situados a 6-m y 0.5 m por encima del suelo. Adicionalmente, se instalaron dos termómetros infrarrojos (Apogee SFI-111) para el monitoreo continuo de temperatura superficial del dosel y del suelo junto con tres sensores para medir temperatura y humedad relativa del aire (Campbell CS215) a 5.6, 2.7 y 0.1 m de altura de la superficie. Temperatura del suelo a 10-cm y precipitación fueron medidos con un sensor Hydra probe II y un pluviómetro de balancín TR-525I respectivamente. Los datos se almacenaron cada 30 minutos del 7 de enero de 2017 al 7 de enero de 2018 en un *datalogger* Campbell CR1000. El sitio contaba con un equipo de covarianza de vórtices para conocer el flujo de evapotranspiración real y sensores de pulso de calor para la estimación de transpiración de los árboles dentro de la parcela. Previo a la estimación de evaporación del suelo por el modelo MEP, es requerido calcular algunos parámetros adimensionales:

$$\sigma(T_s, q_s) = \frac{\lambda^2 q_s}{C_p R_v T_s^2} \quad (1)$$

$$\beta(\sigma) = 6 \left(\sqrt{1 + \frac{11}{36} \sigma} - 1 \right) \quad (2)$$

Donde \square es un parámetro adimensional de cambio de fase líquido-vapor en el suelo. R_v es la constante de gas para vapor de agua (461.5 J/kg°C), C_p es la constante de calor específica del aire (1013 J/kg°C). T_s es la temperatura a 0.1-m del suelo, q_s es la humedad específica en la superficie del suelo (kg/kg). $\beta(\sigma)$ representa el valor recíproco del Bowen ratio que posteriormente se utiliza para calcular calor sensible (H_s), calor latente ($E\square$) y evaporación del suelo (E):

$$H_s = \frac{R_n}{1 + \beta(\sigma)} \quad (3)$$

$$E\square = \beta(\sigma) H_s \quad (4)$$

$$E = \frac{E\square}{\lambda} k_u \quad (5)$$

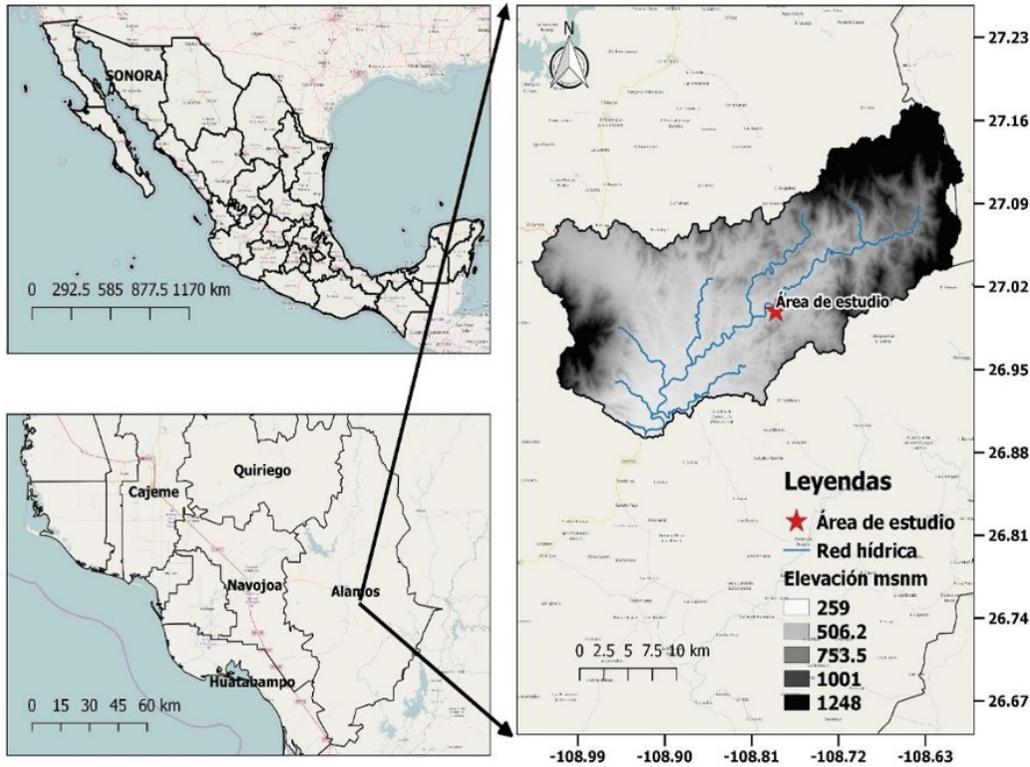


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en una escala nacional, regional y dentro de la cuenca del río Cuchujaqui.

Donde k_u factor de conversión (1.8×10^6 para mm/30-min), \square es el calor latente de vaporización (2260×10^3 J/kg), R_n es la radiación neta en la superficie del suelo. Para la estimación de transpiración por el modelo MEP es requerido calcular la función adimensional de corrección estomática (E_f):

$$E_f = \frac{C_{max}}{1 + e^{-K(\Delta VPD - \Delta VPD_{50})}} \frac{e_{sa}}{e_{sf}} \quad (6)$$

Donde C_{max} es la fracción máxima de conductancia estomática ($C_{max}=1$), K es la pendiente de ΔVPD en relación a el factor de reducción de la conductancia estomática, ΔVPD es el diferencial de déficit de presión de vapor entre la hoja y el aire, e_{sa} es la presión de vapor saturada del aire y e_{sf} es la presión de vapor saturada del follaje. Posteriormente, se calcula la humedad específica del follaje (q_f), la radiación capturada por el follaje (R_{nf}), el parámetro de cambio de fase líquido-vapor en el follaje (\square) y finalmente la transpiración del follaje (T).

$$q_f = q_a E_f \quad (7)$$

$$\sigma(T_f, q_f) = \frac{\lambda^2 q_f}{c_p R_v T_f^2} \quad (8)$$

$$R_{nf} = R_{n_u} (1 - e^{-kLAI}) \quad (9)$$

$$T = \frac{k_u R_{nf}}{\lambda(1 + \beta^{-1}(\sigma))} \quad (10)$$

Donde R_{nu} es la radiación neta (W/m^2) por encima del dosel, k es el coeficiente de transmisión óptica (0.61) propuesto por Maass et al. (1995), LAI es el índice de área foliar (m^2/m^2), T_f es la temperatura de la superficie del dosel, q_f es la humedad específica en el follaje (kg/kg) y q_a es la humedad específica del ambiente (kg/kg) a 5.6-m del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estimaciones de transpiración del modelo MEP son similares con las observaciones de flujo de savia (Fs) durante el periodo de observación (20 días). El modelo tuvo un excelente desempeño con un coeficiente de correlación (CC) de 0.93 y una raíz cuadrada del error medio (RCEM) de 0.014-mm (Figura 2) similar a los encontrados por Hajji et al. (2018), Wang et al. (2017) y Wang et al. (2018).

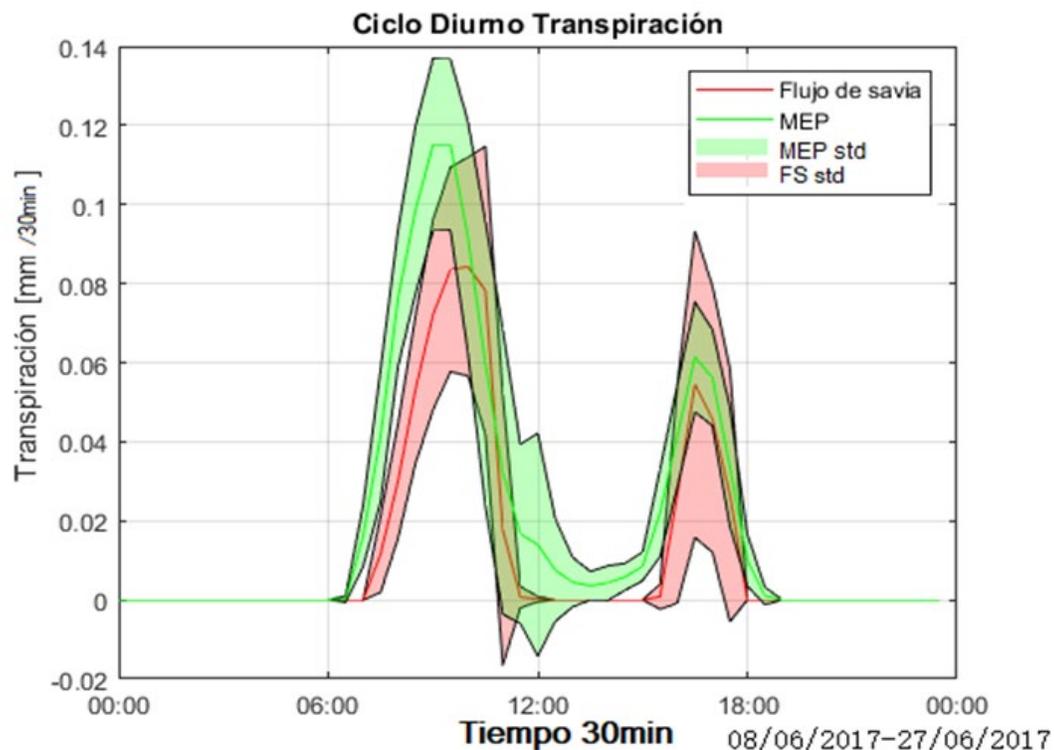


Figura 2: Comparación de tasa de transpiración medida con sensores de flujo de savia (línea roja) y los estimada con el modelo MEP (línea verde).

Los resultados de evapotranspiración exhiben una dinámica coherente con los pulsos de precipitación (Figura 3a). En los meses secos (enero-junio) ET es casi nula, pero esta se incrementa abruptamente en los meses húmedos (julio-agosto) siguiendo bien la dinámica de evapotranspiración real (Figura 3b). ET estimado con el modelo MEP tuvo un excelente desempeño con un CC de 0.93 y un RCEM de 0.73 mm/día, valores parecidos a los reportados por Hajji et al. (2018) y Wang et al. (2017, 2018).

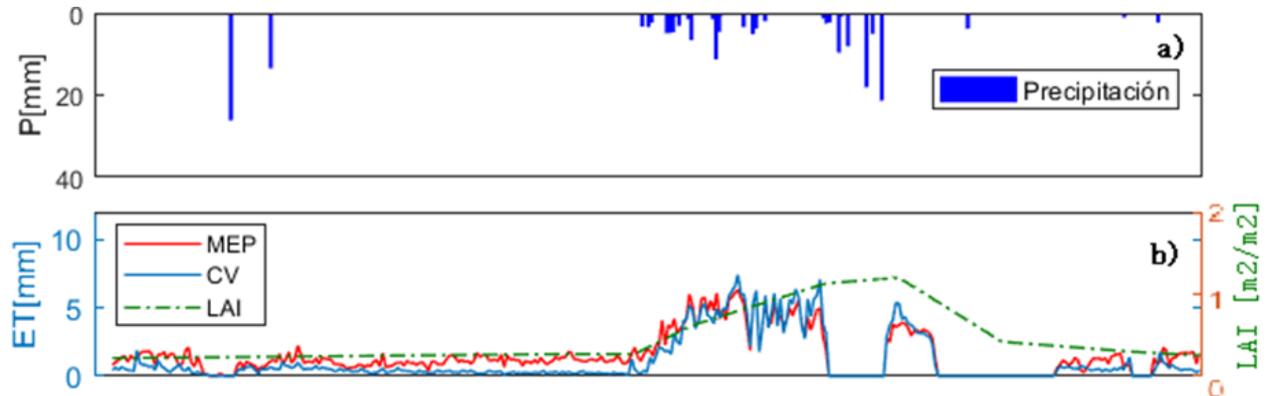


Figura 3: a) Precipitación acumulada en el sitio durante el periodo de estudio. b) Comparación de la serie de tiempo de evapotranspiración (ET) observada mediante la técnica de covarianza de vórtices (CV) y la estimada mediante el modelo MEP.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran que el modelo de producción máxima de entropía (MEP) es una buena alternativa para medir tanto evapotranspiración como la partición de sus dos principales componentes, evaporación del suelo y transpiración del dosel. A pesar de que el modelo emula muy bien la dinámica estacional y diurna de evapotranspiración y transpiración, es necesario realizar más observaciones de transpiración empleando otro método (flujo de savia o isotopos estables) para validar correctamente el modelo MEP. En este trabajo debido a las fallas en los sensores de savia solo se utilizaron 20 días, sin embargo, se recomienda un periodo más extenso que incluya diferentes condiciones ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- Hajji, I., Nadeau, D. F., Music, B., Anctil, F., & Wang, J. (2018). Application of the maximum entropy production model of evapotranspiration over partially vegetated water-limited land surfaces. *Journal of Hydrometeorology* (2018).
- Maass, J., Vose, J. M., Swank, W. T., & Martínez-Yrizar, A. (1995). Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. *Forest Ecology and Management*, 74(1-3), 171-180.
- Méndez-Barroso, L. A., Vivoni, E. R., Robles-Morua, A., Mascaro, G., Yépez, E. A., Rodríguez, J. C., Saíz-Hernández, J. A. (2014). A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. *Water Resources Research*, 50(4), 3229-3252.
- Newman, B. D., Wilcox, B. P., Archer, S. R., Breshears, D. D., Dahm, C. N., Duffy, C. J., Vivoni, E. R. (2006). Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research*, 42(6).
- Wang, H., Tetzlaff, D., & Soulsby, C. (2017). Testing the maximum entropy production approach for estimating evapotranspiration from closed canopy shrubland in a low-energy humid environment. *Hydrological Processes*, 31(25), 4613-4621.
- Wang, H., Tetzlaff, D., & Soulsby, C. (2018). Modelling the effects of land cover and climate change on soil water partitioning in a boreal headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 558, 520-531.
- Wang, J., y Bras, R. (2011). A model of evapotranspiration based on the theory of maximum entropy production. *Water Resources Research*, 47(3).

Wilcox, B., Seyfried, M., Breshears, D., Stewart, B., & Howell, T. (2003). The water balance on rangelands. *Encyclopedia of water science*, 791-794.

Yepez, E. A., Williams, D. G., Scott, R. L., & Lin, G. (2003). Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 119(1-2), 53-68.

HACIA UNA SÍNTESIS DE DATOS DE FLUJOS DE CO₂ DE SUELO EN MÉXICO

Alejandro Cueva¹; Susana Alvarado-Barrientos²; José Luis Andrade³; Fernando Arellano-Martin⁴; Fernando Ayala-Niño⁵; Stephen H. Bullock⁶; Mónica Cervantes-Jimenez⁷; Bruno Chavez-Vergara⁸; Josué Delgado-Balbuena⁹; Dulce Flores-Rentería¹⁰; Eugenia González-del Castillo¹¹; Cesar Hinojo-Hinojo¹²; Claudia J. Olivas-Castillo¹³; Elí Pérez-Ruiz¹⁴; Zulia Sánchez-Mejía¹³; Tonantzin Tarin¹⁵; Martha L. Vargas-Terminel¹³; Samuel Villarreal¹⁶; Enrico A. Yépez¹³

¹El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa. Villahermosa, Tabasco; ²Red de Ecología Funcional, Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Veracruz; ³Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán; ⁴Campo Experimental Chetumal, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Othón P. Blanco, Quintana Roo; ⁵Laboratorio de Edafología Aplicada y Servicios Ambientales. Unidad de Biotecnología y Prototipos (UBIPRO). Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Tlalnepantla, Estado de México; ⁶Departamento de Biología de la Conservación, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., Ensenada, Baja California; ⁷Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro; ⁸Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México; ⁹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Agricultura Familiar. INIFAP, Ojuelos de Jalisco, Jalisco; ¹⁰CONAHCyT - Grupo de Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Saltillo, Coahuila; ¹¹Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México; ¹²ICTUS, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora. México; ¹³Departamento de Ciencias del Agua y Medioambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora; ¹⁴Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua; ¹⁵Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México; ¹⁶Centro de Investigación en Materiales Avanzados - Subsección Durango. Durango.

RESUMEN

La respiración del suelo (Rs) es el segundo flujo de carbono de mayor magnitud entre la superficie terrestre y la atmósfera. Diversas síntesis de conocimiento sobre la Rs y el intercambio de otros gases de efecto invernadero (GEI) han sugerido compilar bases de datos de Rs e información auxiliar para poder realizar mejores inventarios de carbono y comprender los controles biofísicos de este flujo. En esta contribución presentamos los primeros avances de una base de datos que compila mediciones in situ de Rs realizadas en México, denominada MexFlux-S. Se encontraron 30 publicaciones resultando en 3294 observaciones de Rs distribuidas en México desde 1999 hasta 2021. Los ecosistemas representados en los estudios fueron bosques, desiertos, pastizales, matorrales, humedales, y agrosistemas. La distribución de los datos es asimétrica positiva, teniendo un promedio general para las tasas de Rs de $4.16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que la mediana fue de $2.12 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, presentando una desviación estándar de $\pm 7.39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; estos momentos estadísticos varían entre los ecosistemas. A pesar de que se realizó una extensiva búsqueda bibliográfica, aún quedan observaciones no incorporadas a la base de datos debido a dificultades para extraer las tasas de Rs desde las publicaciones. Hacemos una invitación a colaboradores a contribuir a esta base de

datos, con la intención de avanzar en la comprensión del ciclo del carbono en los suelos de México y el mundo.

PALABRAS CLAVE: *Descomposición; Materia orgánica; Respiración autótrofa; Respiración de suelo; Respiración heterotrófica.*

INTRODUCCIÓN

La respiración de suelo (R_s), definida aquí como el flujo de dióxido de carbono (CO_2) del suelo hacia la atmósfera y viceversa, es el segundo flujo de carbono de mayor magnitud entre la superficie terrestre y la atmósfera, solo antecedido por la captura de CO_2 debido a la productividad primaria bruta de la vegetación. La R_s tiene componentes bióticos (p.ej., respiración de raíces de la vegetación, metabolismo microbiano), y abióticos (p.ej., desgasificación de los poros del suelo, disolución y precipitación de carbonatos, fotooxidación de la materia orgánica) (Barba et al., 2018). Además, la R_s es un indicador de la actividad biológica del suelo y la descomposición de materia orgánica, por lo tanto, también se ha propuesto como un indicador de la salud o calidad del suelo.

Hace más de una década se estimó que los suelos a nivel global podrían emitir 98 ± 12 Pg C año⁻¹ (1 Pg = 1015 g) (Bond-Lamberty y Thomson, 2010). Recientemente, utilizando una mayor cantidad de información y herramientas de *machine learning*, se ha estimado que los suelos podrían emitir 78.76 ± 7 Pg C año⁻¹ (Jian et al., 2018). Sin embargo, uno de los problemas fundamentales en ambas estimaciones es el sesgo en la distribución espacial de la información (Huang et al., 2020), debido a que los países del norte global, particularmente los Estados Unidos, Europa, Canadá, y China contribuyen con la mayoría de las observaciones.

Existen bases de datos especializadas de R_s que constantemente se están actualizando (p. ej., SRDB, COSORE, MGRsD). Sin embargo, en estas bases de datos México se encuentra subrepresentado. Por ejemplo, en la versión más reciente de la *Soil Respiration Database* (SRDB V5; N = 10366), que recopila información global a una escala temporal anual, solo existen 35 registros de 10 estudios realizados en México (0.33 % del total de registros). Por otro lado, en la *Monthly Global Soil Respiration Database* (MGRsD; N = 13482), que recopila información a una escala temporal mensual, solo existen 57 registros de tres estudios realizados en México (0.42 % del total de registros). Esta subrepresentación podría ser debido a una menor disponibilidad de recursos materiales y humanos para llevar a cabo mediciones de R_s , barreras de lenguaje (Jian et al., 2021), los medios elegidos para comunicar los resultados (p.ej., artículos científicos, memorias en congresos, capítulos de libro, tesis), diferencias culturales y administrativas para la gestión, administración, transparencia, y disponibilidad de datos científicos, y las diferentes permutaciones de estos factores.

En México se han realizado diversas síntesis de conocimiento sobre la R_s y el intercambio de otros GEI entre el suelo y la atmósfera (Briones et al., 2018; Cueva et al., 2016; Martínez-Yrizar et al., 2017; Saynes Santillán et al., 2016). Estas síntesis han aportado el estado del arte de flujos de carbono (C) y otros GEI en épocas recientes, sin embargo,

es necesario dar un siguiente paso haciendo una colección de datos abierta y actualizada. De esta forma se podrá: 1) tener mejores estimados nacionales y globales de Rs con una mejor representación de ecosistemas que ocurren en un país megadiverso como México, 2) determinar parámetros importantes utilizados para inventarios y proyecciones a futuro de emisiones de C (p.ej., Q10, factores de emisión), así como indicadores de salud del suelo, y 3) descubrir propiedades emergentes de los ecosistemas poco representados en síntesis globales.

Los objetivos principales de esta contribución es presentar una base de datos de mediciones de Rs en México, denominada MexFlux-S, derivada de una búsqueda bibliográfica exhaustiva en diferentes repositorios de literatura científica, así como detonar el interés en la comunidad científica a continuar con su construcción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fuentes de información

Se hicieron búsquedas en *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *ISI Web of Science*, *Springer Link*, así como en el Sistema de Clasificación de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. Para la búsqueda en idioma inglés, se utilizaron los términos “*soil respiration*”, “*soil carbon (or CO₂) efflux*”, “*soil carbon (or CO₂) emission*”, “*soil greenhouse gases*”. Para la búsqueda en idioma español, se utilizaron los términos “*respiración de suelo*”, “*flujo de carbono (o CO₂)*”, “*emisión de carbono (o CO₂)*”, “*gases de efecto invernadero de suelo*”. Además, a cada uno de los términos anteriores se les añadió “*Mexico*”, “*LI-8100*”, “*PP-System*”. También, se hizo una búsqueda dentro de las Síntesis Nacionales publicadas por el Programa Mexicano del Carbono.

Colecta de información y criterios de inclusión

Una vez que una publicación fue detectada, se consideraron los siguientes criterios: 1) cuenta con mediciones de Rs realizadas in situ, 2) las mediciones cuentan con información temporal lo suficientemente clara para llegar a incluir, por lo menos, el año y mes de mediciones, 3) las mediciones de Rs fueron periódicas (p.ej., 30-60 min, semanal, quincenal, mensual, estacional), 4) la información de Rs se encuentra en forma de tabla o de figura. Una vez que la publicación fue seleccionada, los datos se extrajeron manualmente, ya sea recopilando la información directamente de tablas, o utilizando el software WebPlotDigitizer V4.6 (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>). En algunos casos se contactó a los autores de correspondencia de las publicaciones y estuvieron dispuestos a compartir la información que fue analizada y presentada de manera resumida en dichas publicaciones. La información que se recopiló incluye: 1) tasas de Rs, 2) temperatura del suelo (Ts), 3) contenido volumétrico de humedad del suelo (SWC), 4) temperatura del aire (Ta), 5) precipitación (PPT), 6) coordenadas geográficas, 7) fecha en que fueron realizadas las mediciones, 8) tipo de ecosistema, 9) método de medición (p.ej., cámara de respiración o gradiente de concentraciones) y la técnica utilizada para estimar la tasa de Rs (p.ej., analizador de gases en infrarrojo, cromatografía, álcali), así como 10)

información genérica sobre la publicación. Finalmente, las tasas de Rs fueron estandarizadas a las unidades de $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron 30 publicaciones que cumplieron con los criterios establecidos, resultando en 3294 observaciones de Rs distribuidas en México (Figura 1). Las observaciones provienen principalmente de mediciones con una frecuencia mensual, pero existen estudios que hicieron observaciones semanales, estacionales, así como series de tiempo con intervalos de medición de 30-60 minutos. Los ecosistemas representados en los estudios fueron bosques (N = 1003), desiertos (N = 614), pastizales (N = 383), matorrales (N = 243), humedales (N = 72), así como agrosistemas (N = 979).

La distribución de los datos no fue Gaussiana sino asimétrica positiva (Figura 1), con una mayor concentración de datos entre 0 y 5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y una larga cola con tasas de Rs $>30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El promedio general para las tasas de Rs fue de 4.16 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que la mediana fue de 2.12 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, presentando una desviación estándar de $\pm 7.39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Las tasas de Rs fueron determinadas por medio de analizadores de gases en infrarrojo (IRGA; N = 3124), cromatografía de gases (N = 173), y álcali (N = 168). A pesar de que existen desventajas para las tres técnicas de determinación de las tasas de Rs, consideramos que la información que hemos recabado fue robusta al contar con un 89.4 % de datos realizados con IRGA.

La disponibilidad de información meteorológica auxiliar fue variable entre los estudios (Figura 2). Solo el 21.64 % de las observaciones contaron con el set de mediciones meteorológicas completas (p.ej., Ta, Ts, SWC, PPT), mientras que el 17.46 % de las observaciones sólo contaron con mediciones de Ts, seguido por la combinación de Ts y SWC (14.99 %).

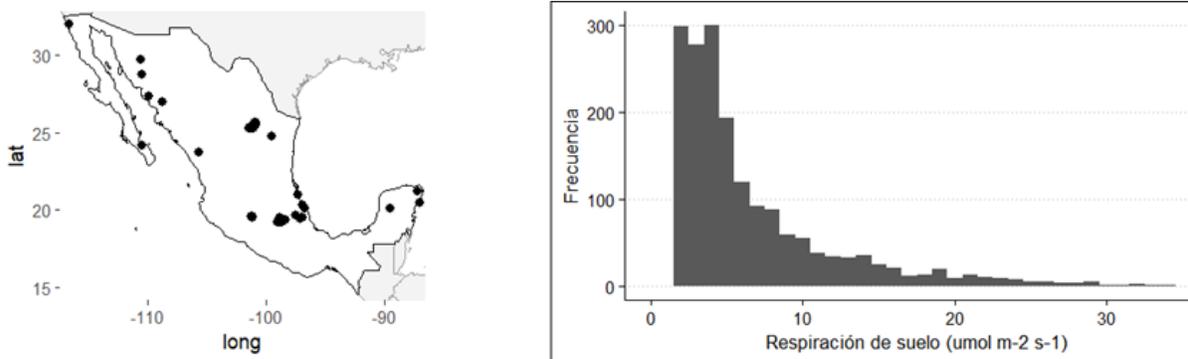


Figura 1. a) Mapa de México con la localización de los datos considerados en este trabajo. Los puntos negros indican los sitios de estudio. b) Distribución de los datos de respiración de suelo (Rs; N= 3294 observaciones).

La falta de información meteorológica auxiliar podría ser subsanada utilizando sets de datos proveniente de reanálisis o interpolaciones espaciales de datos climáticos en alta resolución (p.ej., DayMet, WorldClim). Además, contar con información meteorológica

auxiliar podría servir como método de validación de la información recopilada en las publicaciones.

Por otro lado, aún no recopilamos información auxiliar edafológica (p.ej., tipo de suelo, textura). Contar con observaciones meteorológicas y edafológicas concurrentes con las mediciones de Rs es fundamental para comprender los controles biofísicos que rigen este flujo de carbono. Además, el contar con este tipo de información disminuiría la incertidumbre asociada a las relaciones establecidas ocasionada por la propagación de errores. Otra fuente de información que es necesario incorporar son productos satelitales (p.ej., GPP, fPAR, LAI, NDVI, ET, y LST), que podrían ayudar a realizar escalamientos espaciales a nivel regional o nacional.

Por primera vez en México se ha recopilado una base de datos de tasas de respiración de suelo. Esto va en línea con la sugerencia planteada por Cueva et al. (2016) de compilar una base de datos para avanzar en la investigación de Rs en México. Sin embargo, queda aún más trabajo que realizar. Por ejemplo, la base de datos que se ha recopilado en el presente esfuerzo no cuenta actualmente con un esquema de aseguramiento y control de la calidad (QA/QC) de la información. Es decir, actualmente se ha recopilado la información disponible de publicaciones, sin embargo, el recolectar la información proveniente de la digitalización de imágenes pudo haber añadido incertidumbre a las estimaciones de las tasas de Rs.

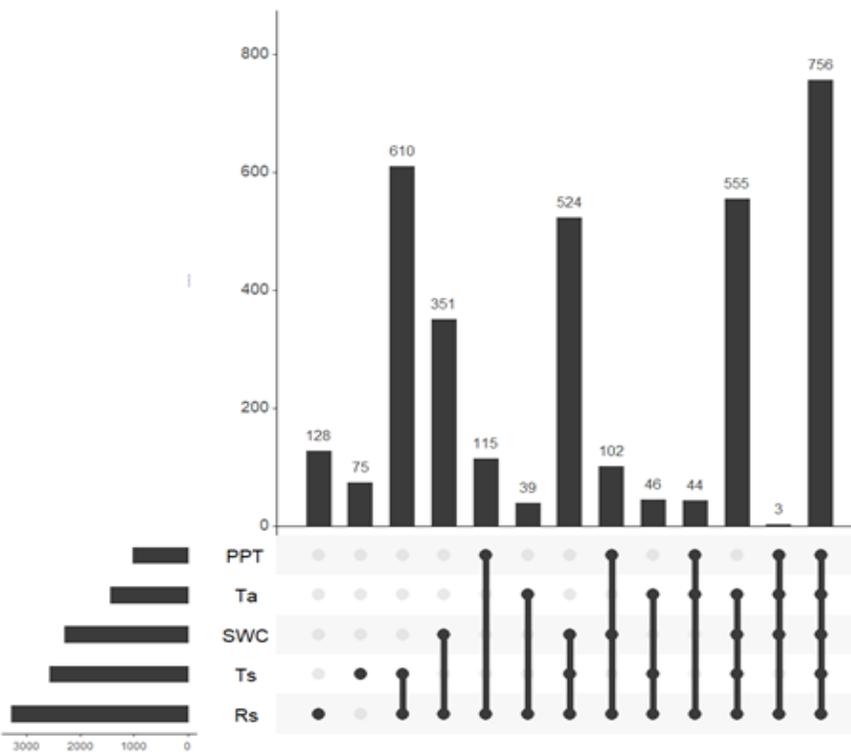


Figura 2. Gráfico UpSet para visualizar las intersecciones de la presencia/ausencia de observaciones en la base de datos, donde PPT es precipitación, Ta es temperatura del aire, SWC es contenido de humedad en el suelo, Ts es temperatura del suelo, y Rs es respiración del suelo.

Es importante contar con una base de datos consolidada y con la mayor cantidad de datos de Rs, sin embargo, aún más importante es convertir estos datos en información y conocimiento. En México existen ecosistemas que han sido poco representados en bases de datos globales. Entonces, MexFlux-S podría habilitar las primeras estimaciones para México del parámetro Q10, que describe la sensibilidad de la Rs ante un aumento de temperatura de 10 °C. A nivel global, con las limitaciones de poca representatividad de ecosistemas no templados, se ha estimado que el parámetro Q10 = 1.4 (Hashimoto et al., 2015). Sin embargo, este valor de Q10 no toma en cuenta observaciones en sitios con temperaturas mayores a 30 °C, añadiendo incertidumbre a éste estimado global. Conocer el parámetro Q10 para ecosistemas mexicanos, y afinar el estimado global, mejoraría nuestro entendimiento sobre las posibles implicaciones del aumento de temperatura sobre las tasas de Rs, incluyendo el potencial de retroalimentar positivamente al aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y agravar la actual crisis climática global.

BIBLIOGRAFÍA

- Barba, J., Cueva, A., Bahn, M., Barron-Gafford, G.A., Bond-Lamberty, B., Hanson, P.J., Jaimes, A., Kulmala, L., Pumpanen, J., Scott, R.L., Wohlfahrt, G., Vargas, R., (2018). Comparing ecosystem and soil respiration: Review and key challenges of tower-based and soil measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 249, 434-443.
- Bond-Lamberty, B., Thomson, A., (2010). A global database of soil respiration data. *Biogeosciences* 7, 1915-1926.
- Briones, O., Perroni, Y., Castellanos, A.E., Estrada-Contreras, I., Yrizar, A.M., Maya, Y., Montaña, N.M., Pavón, N., Yopez, E.A., (2018). Base de datos sobre almacenes y flujos de carbono en los matorrales y pastizales xerófilos de México. *Elementos para Políticas Publicas* 2, 200-209.
- Cueva, A., Robles Zazueta, C.A., Garatuza Payan, J., Yopez, E.A., (2016). Soil respiration in Mexico: Advances and future directions. *Terra Latinoamericana* 34, 253-269.
- Hashimoto, S., Carvalhais, N., Ito, A., Migliavacca, M., Nishina, K., Reichstein, M., (2015). Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences* 12, 4121-4132.
- Huang, N., Wang, L., Song, X.-P., Black, T.A., Jassal, R.S., Myneni, R.B., Wu, C., Wang, L., Song, W., Ji, D., Yu, S., Niu, Z. (2020). Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Sci Adv* 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8508>
- Jian, J., Steele, M.K., Thomas, R.Q., Day, S.D., Hodges, S.C., (2018). Constraining estimates of global soil respiration by quantifying sources of variability. *Glob. Chang. Biol.* 24, 4143-4159.
- Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Sánchez, J., Maass, M. (2017). Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: dinámica hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo. *Rev. Mex. Biodivers.* 88, 27-41.
- Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J.D., Paz Pellat, F., Alvarado Cárdenas, L.O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana* 34, 83-96.

LA MICROMORFOLOGÍA DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA: 35 AÑOS DE INVESTIGACIÓN EN EL COLEGIO DE POSTGRADUADOS

Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena¹; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena²; Tania González-Vargas¹; Arturo Jiménez-Martínez^{1,3}

¹Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos, Programa de Edafología, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carretera México-Texcoco, Estado de México. 56230; ²Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Francisco I. Madero S/N, Ex. Hacienda el Canadá, General Escobedo 66050, México; ³Posdoctorante del CONAHACYT asignado al Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril de San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª Sección, Iztapalapa, 09310, Ciudad de México, México.

RESUMEN

Las expresiones morfogenéticas de la actividad biológica en el suelo están principalmente centradas en la estructura, la porosidad y los componentes orgánicos. A nivel micromorfología, la estructura del suelo, como producto de la actividad de las raíces, hongos y bacterias ha sido ampliamente investigada; sin embargo, los componentes básicos orgánicos, desde su fracción gruesa hasta amorfa, es uno de los menos estudiados, dada su alta dificultad para la elaboración de secciones delgadas y por los constantes cambios que presentan durante los procesos de degradación y mineralización de la materia orgánica. El objetivo principal para analizar el impacto de la actividad biológica en la formación del suelo generalmente se centra en la cuantificación de los agregados y poros relacionados con el manejo, así como el monitoreo de la actividad de la mesofauna, hongos y bacterias en la descomposición y mineralización de la materia orgánica. En el programa de Edafología, Colegio de Postgraduados se ha impartido el curso de micromorfología de suelos desde hace 35 años y se ha realizado investigaciones multiescalares en diversos tipos de suelo, regiones ecológicas y agroecológicas, en donde la micromorfología ha sido fundamental para entender los procesos de formación y construcción de los suelos. En la presente contribución se reportan algunas de las contribuciones sobre los rasgos asociados con la actividad biológica a nivel de sección delgada bajo diferentes procesos ecológicos y tipos de suelos que ocurren en la república mexicana.

PALABRAS CLAVE: *Componentes orgánicos; Estructura; Mapas temáticos; Micromorfometría; Secciones delgadas.*

INTRODUCCIÓN

Los rasgos que se forman como resultado de la actividad biológica y los procesos de descomposición o fragmentación de los componentes del suelo a nivel micromorfológico fueron reportados por primera vez por Kubiena (Bullock et al., 1985). Sin embargo, la descripción de sus formas, distribución y génesis ha sido una tarea difícil debido a que puede variar desde muy simple hasta extremadamente complejo (Stolt y Lindbo, 2010). Bullock et al. (1985) y Stoops (2003) proporcionaron una guía para su descripción y

cuantificación, la cual se basa en una división de componentes básicos gruesos (raíces, hojas y tallos), finos (hifas y esporas) y materiales orgánicos amorfos (humus) que pueden presentar una o varias rutas de descomposición o fragmentación. Los rasgos orgánicos se pueden cuantificar de manera cualitativa en diferentes grados de descomposición desde pobre, moderada, fuerte y solo contornos (FitzPatrick, 1993) o de manera cuantitativa utilizando escáner de alta resolución (Zaiets y Poch, 2018).

Los rasgos generados por la fauna del suelo, entre bioporos, tipos de estructuras apedales y pedales, así como tipos de excretas fueron reportados de manera exhaustiva por Kooi et al. (2010) quien, además, proporcionó las bases para su descripción. Recientemente, se publicaron dos libros para la interpretación de los rasgos del suelo a nivel micromorfológico (Stoops et al., 2010; 2018).

El estudio de la actividad biológica en secciones delgadas presenta serias dificultades y retos. De acuerdo con Stolt y Lindbo (2010), la materia orgánica es mucho más susceptible a la contracción cuando se somete a secado, debido a los altos contenidos de humedad, por lo que se produce una gran cantidad de artefactos cuando se elaboran las secciones delgadas. FitzPatrick y Gudmundsson (1978) propusieron una fase gaseosa para el intercambio del agua por acetona, la cual da buenos resultados, pero este proceso puede llevar meses hasta lograr el completo reemplazamiento.

En nuestro país, la micromorfología es una disciplina poco abordada y se centra en algunas instituciones. El problema radica en los instrumentos que se requieren para la elaboración de las secciones delgadas como son cortadoras y pulidoras de los bloques y microscopios petrográficos para el análisis de las propiedades ópticas de los componentes del suelo. El Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados ha impartido el curso de micromorfología de suelos desde 1985. La Dra. Klaudia Oleschko introdujo esta disciplina a nuestro país e invitó al Profesor Nicolas Federoff de Francia para dar cursos intensivos sobre micromorfología de suelos utilizando el *Handbook for Soil Thin Section Description* escrito por Bullock et al. (1985). Posteriormente, la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena retomó el curso, después de hacer una estancia académica y ser dirigida en su tesis doctoral por el Profesor Georges Stoops de la Universidad de Gante, Bélgica.

El objetivo de la presente contribución es proporcionar una revisión general de las principales investigaciones en Micromorfología de Suelos que se han realizado en el Programa de Edafología (periodo 1988-2013) sobre las expresiones morfo-genéticas de la actividad biológica a nivel de sección delgada de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se seleccionaron algunas investigaciones y dirección de tesis de maestría y doctorado, en donde describieron y analizaron los rasgos dejados por la actividad biológica a nivel de sección delgada, elaboradas a partir de diferentes tipos de suelos de la república mexicana durante el periodo de 1988 hasta 2013.

RESULTADOS

Algunas de las contribuciones que se ha realizado en el Programa de Edafología se reportan a continuación:

Estructura del suelo. Estudios sobre el desarrollo estructural se han realizado en suelos volcánicos (Ávila-Campuzano et al., 2011), sistemas agroforestales (Hernández-Ordoñez et al., 2018; Vargas-Mendoza et al., 2013). Además, para evaluar el impacto de los mejoradores orgánicos en suelos degradados (Ochoa- Estrada et al., 2008).

Actividad de las raíces. Las raíces tienen fuerte influencia en la incorporación de materia orgánica al suelo y contribuyen en la formación de canales y estructura apedal ahuecada (CONACYT-CP, 2022). En suelo arcillosos redondean la superficie de los agregados y forman de bloques subangulares y granulares incrementando el espacio poroso y por lo tanto la aireación (Torres-Guerrero et al., 2020). En suelos arenosos, las raíces compactan y adhieren a los minerales reduciendo macro poros e incrementando los microporos para el almacenamiento de la humedad (De León-González et al., 2007). De esa manera, tienen diferentes funciones de acuerdo con la textura del suelo.

Actividad de mesofauna. La mesofauna es la responsable de fragmentar los residuos vegetales, de generar canales (estructura esponjosa) y dejar excretas que formarán posteriormente agregados migajosos, con poros de empaquetamiento compuesto (Ávila-Campuzano et al 2011). Además, ayudan a dispersar esporas e inocular los suelos, como en el caso de las micorrizas (González Chávez et al., 2009).

Hongos. Los hongos del suelo tienen la función de atrapar partículas y dar estabilidad los agregados. Jiménez-Martínez (2018) demostró que la anatomía de los hongos influye en la formación de micro y macro agregados y que no siempre enlazan partículas, sino que pueden encapsularlas y asociarse con materiales arcillosos específicos como piedra pómez o arcillas de tipo imogolita.

Bacterias. Este tipo de microorganismos participa en el proceso de humificación de la materia orgánica; sin embargo, su distribución en el suelo presenta patrones heterogéneos formando colonias o *biofilms* bacterianos cercanos a las paredes de los bioporos, o bien asociándose con las vesículas de los granos minerales (Gutiérrez-Castorena et al., 2016).

Componente básico orgánico. Cuantificar a cada uno de los grados de descomposición de la materia orgánica ha sido uno de los retos más difíciles debido a que no forman rasgos discretos y pueden opacar a otros componentes del suelo. La elaboración de mosaicos de alta resolución y análisis de imágenes en toda la sección delgada (Gutiérrez-Castorena et al., 2018); además de la creación de modelos utilizando los grados de brillantez de cada etapa de descomposición de la materia orgánica (González-Vargas y Gutiérrez-Castorena, 2022) facilitó su rápida identificación y cuantificación.

Incendios forestales. Los cambios que ocurren en la estructura, porosidad y mineralogía del suelo después de incendios de diferentes intensidades y tipos de

vegetación han sido monitoreados a nivel micromorfológico por Hernández-Vallecillo et al. (2020).

Micromorfometría. La microcartografía de secciones delgadas, utilizando diferentes fuentes de luz y mapas temáticos de toda la sección delgada, permitió determinar los patrones básicos y relacionados de las bacterias en diferentes tipos de suelos y cultivos de interés agronómico (Gutiérrez-Castorena et al., 2016).

CONCLUSIONES

En 35 años de investigación micromorfológica (1988-2023) se han estudiado suelos de diferentes regiones del país, condiciones ecológicas, diferentes tipos de manejos, incendios forestales, y formulación de sustratos. La construcción de mosaicos de alta resolución en secciones delgadas completas, elaboración de mapas temáticos de diferentes componentes del suelo utilizando operadores espaciales, y generación de modelos de algunos componentes orgánicos del suelo es una de las propuestas más importantes del Programa de Edafología.

El análisis micromorfológico de la actividad biológica es una herramienta útil para determinar la influencia que tienen la mesofauna, las raíces, hongos y bacterias en la formación de agregados y poros del suelo o bien en procesos pedogénéticos como la descomposición de la materia orgánica.

BIBLIOGRAFÍA

Ávila-Campuzano, G., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ortiz-Solorio, C., Ángeles-Cervantes, E., Sánchez-Guzmán, P. (2011). Evaluación de Las Reforestaciones en La Formación de Suelo A Partir de Tepetates. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y de Ambiente, 17(3), 303-312.

Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U. (1985). Handbook for Soil Thin Section Description. Waine Research Publications, Wolverhampton, UK, 152 p.

CONACYT-CP. (2022). Ecosistema nacional informático del lago de Texcoco. <https://socioecologia.conacyt.mx/texcoco/>.

De León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M., Castillo-Juárez, H. (2007). Root-Aggregation in a Pumiceous Sandy Soil. Geoderma, 142(1), 308-317.

FitzPatrick, E.A. (1993). Soil Microscopy and Micromorphology. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 304 p.

FitzPatrick, E.A., Gudmundsson, T.. (1978). The impregnation of wet peat for the production of thin sections. Journal of Soil Science 29, 585-587.

González-Chávez, M., Carrillo-González, R., Gutiérrez-Castorena, M.C. (2009). Natural attenuation in a slag heap contaminated with cadmium: the role of plants and arbuscular mycorrhizal fungi. Journal of Hazardous Materials, 161(1), 1288-1298.

González-Vargas, T., Gutiérrez-Castorena, M.C. (2022). Brightness Values-Based Discriminant Functions for Classification of Degrees of Organic Matter Decomposition in Soil Thin Sections. Spanish Journal of Soil Science 12:10348.

Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Vargas, T., Cajuste-Bontemps, L., Delgadillo-Martínez, J., Suástegui-Méndez, E., Ortiz-Solorio, C. (2016). Micromapping of microbial

hotspots and biofilms from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, 279, 11-21.

Gutiérrez-Castorena, M.C., Suástegui-Méndez, E., González-Vargas, T., Gutiérrez-Castorena, E., Ortiz-Solorio, C., Cajuste-Bontemps, L., Rodríguez-Mendoza, M.N. (2018). Thematic micro-maps of soil components using high-resolution spatially referenced mosaics from whole soil thin sections and image analysis. *European Journal of Soil Science*, 69, 217-231.

Hernández-Ordoñez, J., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ortiz-Solorio, C., Sánchez-Guzmán, P., Ángeles-Cervantes, E. (2018). Calidad de Andosols en Sistemas Forestal, Agroforestal y Agrícola Con Diferentes Manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 179-189.

Hernández-Vallecillo, G., Gutiérrez-Castorena, M.C., Barragán-Maravilla, S., Ángeles-Cervantes, E., Gutiérrez-Castorena, E. V., Ortiz-Solorio, C. (2020). La Mineralogía en La Estimación de Las Temperaturas de Los Incendios Forestales y Sus Efectos Inmediatos en Andosoles, Estado de México. *Madera y Bosque*, 26(1), 1-14.

Jiménez-Martínez, A. (2018). Formación de agregados de suelo en la interacción suelo-raíz microorganismos endófitos: micromorfología y análisis de imágenes. Tesis de Doctorado. Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados.

Kooistra, M.J., Pulleman, M.M. (2010). Features related to faunal activity. In Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. (eds.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, Amsterdam, pp. 397-418.

Ochoa-Estrada, S., Ortiz-Solorio, C., Gutiérrez-Castorena, M.C., Silva-García, J., Quintero-Lizaola, R. (2008). Aplicación directa de residuos sólidos orgánicos municipales a suelos volcánicos. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 53-62.

Stolt, M.H Lindbo., D.L., (2010). Soil organic matter. In Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. (eds.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, Amsterdam, pp. 369-396.

Stoops, G., (2003). *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 184 p.

Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. (eds.). (2010). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, Amsterdam, pp. 369-396.

Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (eds.). (2018). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Second Edition, Elsevier, Amsterdam.

Torres-Guerrero, C., Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V., Ortiz-Solorio, C., Herrera, J.M. (2020). Cuantificación de los componentes del suelo en secciones delgadas: Mosaicos de alta resolución versus imágenes individuales. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1): A300919.

Vargas-Mendoza, M., López-Ortiz, S., Ávila-Reséndiz, C., Campbell, W., Gutiérrez-Castorena, M.C., Medinilla-Salinas, L. (2013). Growth, Productivity and Quality of *Megathyrus Maximus* Under Cover from *Gliricidia Sepium*. *Agroforestry Systems*, 37(4), 891-899.

Zaiest, O., Poch, R.M. (2018). Use of micromorphology for humus characterization and classification in some mediterranean calcareous soils. *Applied Soil Ecology*, 123: 672-681.

MEDICIONES DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO EN LA ZONA MINERA DE HIDALGO

Erika María López-García*; Otilio Arturo Acevedo-Sandoval

Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), Ciudad del Conocimiento, CP 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo. *erika.lopez@correo.buap.mx

RESUMEN

Las mediciones limitadas de la erosión del suelo, el transporte de sedimentos y la deposición debido a las actividades de la minería dificultan la planificación de la gestión del suelo y el agua en las cuencas mineras. En este estudio, se utilizó un modelo de Ecuación de Pérdida de Suelo Universal para identificar las zonas probables de prácticas en las coberturas vegetales que inciden en la erosión del suelo en el Distrito Minero de Molango, Hidalgo. Los resultados del mapa de factores de longitud e inclinación de la pendiente y factor de prácticas de cobertura y gestión, nos indicaron seis tipos de pendientes en el escenario topográfico. En la parte nororiental y sureste de la zona, el suelo es muy sensible a los procesos de erosión, debido a las explotaciones mineras. Por lo tanto, los valores del factor C (cubierta vegetal) son altos en la parte de zonas agrícolas, y bajos en las zonas de bosque, pastos y praderas. Este estudio evaluó la eficacia del modelo USLE en un entorno SIG, la identificación de áreas con el mayor riesgo de erosión apoya la posibilidad de utilizar el modelo para el uso de la tierra y para la planificación de su manejo.

PALABRAS CLAVE: *Erosión hídrica; Metales pesados; SIG; USLE.*

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica del suelo trae consigo impactos ambientales tales como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico, bajos rendimientos en la producción agrícola y pecuaria, degradación de la cubierta vegetal y pérdida de la biodiversidad que favorecen los desastres naturales. Las principales causas de la degradación de la tierra en México, por el grado de ocurrencia son, la urbanización con 5.7%, actividades agropecuarias con 35% y pérdida de cobertura vegetal con 7.4% (Aguirre et al., 2017). Específicamente, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) permite estimar la pérdida anual de suelo debido a la erosión hídrica; por ejemplo, en el desierto de Sonora en México, se desarrollaron una serie de modelos potenciales de erosión basados en factores de la USLE, donde adaptaron dos factores por categoría y superficie espacial, el factor C y el factor P (soporte práctica y gestión), que les proporcionó información a escala de paisaje en áreas vulnerables a la erosión de procesos y actividades humanas y son lo suficientemente detallados para la gestión adaptativa y la planificación de la restauración (Villareal et al., 2016). En nuestro caso la industria minera es una de las actividades económicas considerada esencial, la minería representa el inicio de todas las cadenas productivas industriales y está presente, no solo en toda actividad económica, sino en nuestra vida diaria. Pero también es una de las principales preocupaciones de

contaminación que genera el desmonte, incluidos los relaves de las actividades de procesamiento de minerales. En el estado de Hidalgo (México), el Distrito Minero comprende diez municipios de los cuales Molango de Escamilla, Lolotla, Tepehuacán de Guerrero, Tlanchinol y Xochicoatlán tienen tres importantes yacimientos de extracción del mineral de manganeso. Con base en la interpretación de datos y el análisis USLE, las tendencias en la pérdida de suelo se establecieron bajo diversas condiciones geoambientales, como diferentes ángulos y longitudes de pendiente. Esto proporciona una base sólida para planificar e implementar prácticas sólidas de gestión ambiental para la extracción del mineral.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en la zona centro oriente de la República Mexicana, al norte del estado de Hidalgo. Las coordenadas se encuentran entre los paralelos 20°45' a 21°00' de latitud norte y los meridianos 98°40' a 99°00' de Longitud Oeste. Con altitud entre 637 y 2 371 msnm. La superficie total es de 17 532 km². Presenta una temperatura media anual de 19 °C y una precipitación media anual de 2300 mm. Se utilizaron imágenes digitales de satélite Landsat ETM con un path 25 y row 47 que se interpretaron y clasificaron a través de la composición de las bandas de falso color (FCC). Las imágenes satelitales se rectificaron usando el mapa topográfico de los municipios de a escala de 1:50 000. Los datos de precipitación anual fueron obtenidos por las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el mapa edafológico obtenido por Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI). Se utilizó el Arc GIS 10.5 para la georreferenciación y digitalización de mapas topográficos, aplicando la fórmula universal de la erosión de suelo (USLE) (Environment Systems Research Institute (Esri) Inc., Redlands, CA, EE. UU.; Napoli et al., 2016). La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (1), involucra seis parámetros básicos:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \dots \dots \dots (1)$$

Donde A es el promedio de erosión del suelo por unidad de superficie (t/ha año); R, el Factor de erosividad de la lluvia (MJ mm/ha h); K, el factor de erosionabilidad del suelo (t ha/h MJ mm); L, es el factor de longitud de la pendiente; S, es el factor de grado de la pendiente; C, es el Factor de cobertura vegetal, manejo y prácticas de cultivo, y P, el factor de prácticas mecánicas. L, S, C y P son dimensionales.

El factor R se calculó usando una regresión empírica alternativa propuesta por Nachtergaele et al. (2010) (2), con los datos de las estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en los sitios de Zacate Grande, Tlanchinol, Calnali, Molango, Centro.est.tec.agrop. 6, Zontecomatlan, Zacualtipan, Encarnación, La lagunita, Jaltocan y San Felipe Orizatlán

$$R = 1.20785P - 0.002276P^2 \dots \dots \dots (2);$$

donde P es la precipitación media anual en mm.

La erosionabilidad del suelo (K) indica la susceptibilidad de éste por la erosión de escorrentía y se determinó por separado. Fueron identificados seis diferentes tipos de suelo en el área de estudio. Para determinar las tasas de erosión del suelo se consideraron las variables longitud de la pendiente (L), inclinación de la pendiente (S) y morfología de la pendiente por deposición y producción de sedimentos. El modelo de elevación digital (DEM) fue elaborado a partir de las curvas de nivel del área de estudio a una escala 1:50 000 con contornos e intervalos de 20 m y se clasificó con 6 tipos de pendiente con un tamaño de celda de 100 m. Se asignaron valores del factor S a cada clase de pendiente. El factor LS se obtuvo multiplicando los factores L y S.

El factor C representa el promedio de la pérdida de suelo como una variable en el tiempo, en relación a las variables S, L y R, cada una ponderada en función de la erosión por lluvia durante ese mismo período de tiempo (Renard et al. 1997), donde $EI30i$ (MJ mm/ha h) y $SLRi$ son, respectivamente, la precipitación, erosividad y la relación de pérdida de suelo calculada para el mismo período. Cada cobertura terrestre fue asignada con su factor C correspondiente, según Hurni (1985), Reusing et al. (2000) y Ali y Hagos (2016). A partir de la asignación de los factores C para los usos de la tierra en el área, se elaboró un mapa con cuadrícula de 100 m de tamaño de celda. El factor de prácticas de control de la erosión (P) expresa los efectos de las prácticas de conservación que reducen la cantidad y tasa de escorrentía del agua (Cuadro 1), lo que reduce la erosión debido a las prácticas de gestión agrícola tales como la labranza y siembra en contorno, el cultivo en franjas, el cultivo en terrazas y el drenaje subsuperficial (Karamage et al., 2016c).

Cuadro 1. Factor de prácticas de conservación (P)

| Uso de suelo | P factor |
|-----------------------|----------|
| Agricultura | 0.8 |
| Asentamientos humanos | 0.0 |
| Bosque de encino | 0.9 |
| Rosetófilo | 0.8 |
| Pastizal | 0.8 |
| Vegetación secundaria | 0.8 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron seis clases diferentes de pendiente, la diferencia en grados se basa en el escenario topográfico del área. Cerca del 40% del área de estudio se localizó en un gradiente con pendiente entre 0-9% y el resto del área tiene mayor pendiente. Los valores del factor S se asignaron para cada clase de pendiente. Debido al cultivo continuo, la vulnerabilidad de los suelos aumentó posterior a la degradación de materia orgánica en el suelo.

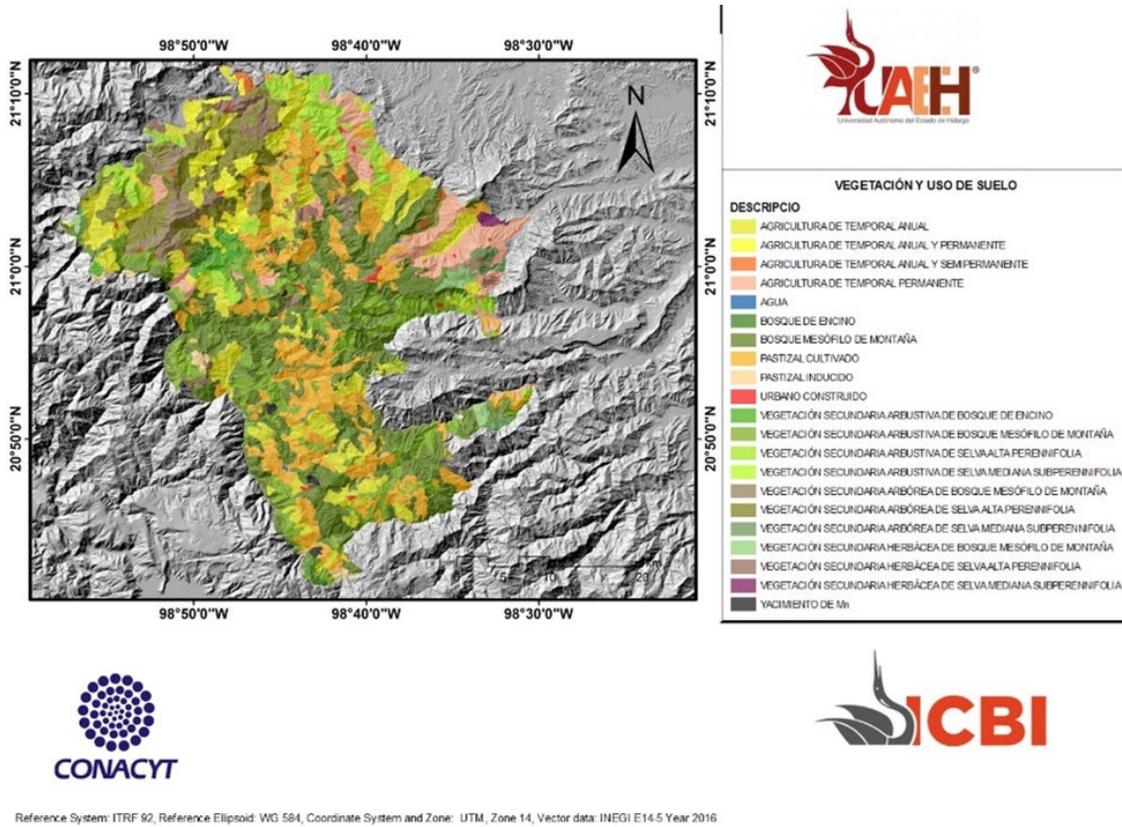


Figura 1. Mapa de cobertura del suelo para el área de distrito minero que muestra la distribución espacial de los puntos en los que se evaluó el factor C. Fuente: INEGI, 2016

Los suelos más profundos que se localizan en pendientes fuertes, son altamente erosionables por que desarrollan poca capacidad de infiltración, generan escorrentía y se erosionan en forma de arroyuelos (Ali y Hagos, 2016). Los valores del factor C se expresan en valores de rango entre 0 y 0.75 (Cuadro 2). En la parte nororiental y sureste de la zona, el suelo es muy sensible a los procesos de erosión, debido al uso de suelo. Por lo tanto, los valores del factor C son altos en la parte de zonas agrícolas, mientras que los valores bajos se localizan en zonas de bosque, pastos y praderas (Figura 1).

Cuadro 2. Valores de las prácticas de gestión de la cobertura

| Uso de suelo/ Cobertura vegetal | C factor |
|------------------------------------|----------|
| Agricultura | 0.75 |
| Agua | 0.00 |
| Bosque de encino | 0.20 |
| Bosque mesófilo de montaña | 0.10 |
| Pastizal cultivado | 0.17 |
| Pastizal inducido | 0.12 |
| Yacimiento minero | 1.00 |
| Zona urbana | 0.005 |
| Vegetación secundaria | 0.18 |

Fuente: Montes-León et al. 2011, Mapa Nacional de Erosión Potencial.

CONCLUSIONES

Este estudio evaluó la eficacia del modelo USLE en un entorno SIG, para interpretar en el campo el uso de la tierra y la gestión de la tierra para fines de planificación. La aplicación del modelo identificó la distribución espacial de las coberturas vegetales clasificándolas en tipos de agricultura, de vegetación primaria y secundaria. El suelo es muy sensible a los procesos de erosión en las zonas nororiental y sureste, debido a las explotaciones mineras. Los valores del factor C (cobertura vegetal) son altos en las zonas agrícolas, y bajos en las zonas de bosque, pastos y praderas. Los mapas generados constituyen un indicador importante de métodos sustentables para los agricultores y, sobre todo, para las autoridades responsables de la planificación, gestión y protección del territorio.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto se llevó a cabo con financiamiento de “Estancias Posdoctorales por México” del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, con No. De CVU 494867, para colaborar en el programa de Doctorado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali S.A., Hagos H. (2016). Estimation of soil erosion using USLE and GIS in Awassa Catchment, Rift valley, Central Ethiopia. *Geoderma Regional*, 7(2): 159-166.
- Karamage F., Shao H., Chen X., Ndayisaba F., Nahayo L., Kayiranga A., Zhang C. (2016c). Deforestation effects on soil erosion in the Lake Kivu Basin, D. R. Congo-Rwanda. *Forests*, 7(11): 281.
- Montes León M.A.L., Uribe Alcántara E.M., García Celis E. (2011). Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(1): 05-17.
- Nachtergaele F., Petri M., Biancalani R., Van Lynden G., Van Velthuisen H., Bloise M. (2010). Global Land Degradation Information System (Gladis); Beta Version. An Information Database for Land Degradation Assessment at Global Level. *Land Degradation Assessment in Drylands Technical Report; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Volume 17.*
- Napoli M., Cecchi S., Orlandini S., Mugnai G., Zanchi C.A. (2016). Simulation of field-measured soil loss in Mediterranean hilly areas (Chianti, Italy) with RUSLE. *Catena*, 145: 246-256.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (1997). *Predicting Soil Loss by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Handbook*. 2014 US Department of Agriculture, Washington, DC, USA 703: 384.
- Reusing M., Schneider T., Ammer U. (2000). Modeling soil loss rates in the Ethiopian highlands by integration of high-resolution MOMS-02/D2-stereo-data in a GIS. *Int. J. Remote Sens.* 21: 1885-1896.
- Villarreal M.L., Webb R.H., Norman L.M., Psillas J.L., Rosenberg A.S., Carmichael S., Sparks P.E. (2016). Modeling landscape-scale erosion potential related to vehicle disturbances along the USA-Mexico border. *Land Degradation & Development*, 27: 1106-1121.

PALEOPEDOGÉNESIS PLEISTOCÉNICA EN LA CUBIERTA EDÁFICA ACTUAL: EVIDENCIAS MICROMORFOLÓGICAS

Sergey Sedov

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Cd. de México, México. serg_sedov@yahoo.com

RESUMEN

La pedogénesis durante la época fría del pleistoceno tardío ocurrió bajo condiciones distintas de las actuales por lo cual los paleosuelos de esta época difieren mucho de los suelos superficiales. Sin embargo, los relictos edáficos pleistocénicos frecuentemente se incorporan en la cubierta edáfica actual que genera una necesidad de su diagnóstico e interpretación correcta. Se realizó un estudio micromorfológico de dos perfiles con los rasgos heredados pleistocénicos en dos ambientes contrastantes – bosque boreal de Rusia Europea y selva baja tropical de la península de Yucatán en sur de México. En el Retisol de Rusia la pedogénesis pleistocénica dejó el horizonte con indicadores macro- y micromorfológicos de gleyzación, que indican desarrollo edáfico en presencia de permafrost durante estadio isotópico marino 3. En Yucatán el horizonte petrocálcico dominado por los carbonatos pedogenéticos se formó en el inicio de la última glaciación bajo condiciones paleoambientales semiáridas. En ambos casos los relictos paleopedológicos pleistocénicos representan horizontes diagnósticos que influyen en la denominación taxonómica de los perfiles estudiados.

PALABRAS CLAVE: *Micromorfología de suelos; Paleosuelos; Pleistoceno tardío; Rasgos relictos; Suelos poligenéticos*

INTRODUCCIÓN

Las condiciones bioclimáticas de la Tierra sufrieron un cambio de gran escala durante la transición de la última época fría del pleistoceno tardío (glaciación Würm – Wisconsin, estadios isotópicos marinos 4-2) a la época cálida actual – el holoceno. Estos cambios ocurrieron en todas las zonas naturales de nuestro planeta y afectaron todos los componentes del paisaje, entre ellos – los suelos. La pedogénesis del pleistoceno tardío difiere de la actual de manera contrastante, que está demostrado por varios estudios de los paleosuelos pleistocénicos sepultados, bien aislados y separados de los perfiles actuales. Sin embargo, en muchos casos los suelos formados en el pleistoceno no fueron cubiertos por las capas sedimentarias profundas y quedaron en la superficie o muy cerca de ella. En esta situación varios productos y rasgos de la pedogénesis antigua se incorporan a la cubierta edáfica actual, coexistiendo con los rasgos de procesos actuales. La discriminación entre los fenómenos relictos y recientes es sumamente importante para la clasificación correcta de suelos, entendimiento de su origen y funcionamiento actual y para su manejo adecuado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La micromorfología proporciona una herramienta poderosa para detectar los rasgos heredados a escala microscópica y estudiar su relación con los procesos actuales sobrepuestos. Se realizó estudio de las láminas delgadas de tres perfiles con rasgos relictos, desarrollados en diferentes regiones con las condiciones ambientales contrastantes: zona templada de Rusia europea y zona tropical del sur de México. Las observaciones se realizaron bajo microscopio petrográfico *Olimpus*, las descripciones se basan en la metodología y terminología de Stoops (2003). La mayor atención se ha prestado a detección de los fenómenos relictos y su relación micro-espacial con los rasgos actuales. Información adicional fue proporcionada por los fechamientos instrumentales (C14, U/Th) y datos mineralógicos y geoquímicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La zona actual de los bosques boreales (taiga) en el noreste de Rusia Europea durante la última época glacial perteneció a la hiper-zona de las tundraestepas periglaciales. Contrario a la pedogénesis actual dominada por procesos de eluviación-iluviación de arcilla, los paleosuelos de la época fría fueron afectados fuertemente por permafrost que provocó un fuerte desarrollo de gleyzación. En varios perfiles en la cuenca superior del río Volga se observaron perfiles de suelos que consisten de los horizontes álbico - E y lúvico - Bt en la parte superior y horizonte gléyico subyacente. En algunos casos encontramos unos morfones húmicos que utilizamos para fechamientos de radiocarbono y produjeron edades calibradas alrededor de 30 000 años.

Las observaciones micromorfológicas demostraron abundantes recubrimientos y rellenos de arcilla iluviada en el horizonte B. Al contrario, en el horizonte gléyico subyacente el tipo principal de pedorasgos fueron nódulos de hierro y manganeso, incorporados en la matriz reducida; entre ellos se observaron unos nódulos concéntricos (Figura 1). Se concluyó que estos rasgos son productos de las condiciones reductoras causadas por permafrost durante la época fría del estadio isotópico marino 3.

En la plataforma calcárea de la Península de Yucatán bajo actual clima tropical subhúmedo se forman suelos con un horizonte húmico somero, denominados Leptosoles Réndzicos. Sin embargo, en múltiples canteras en la zona costera de Quintana Roo se observó una transformación profunda de los carbonatos. Las calizas están representadas por las facies lagunares y calcarenitas del Pleistoceno. Están cubiertas por un estrato carbonatado laminar muy duro que aflora en la superficie o sobre el cual se forma un horizonte húmico delgado. En los cortes extensos se observa que este estrato sigue la conformación del relieve. Observaciones microscópicas demostraron que en la parte baja de este horizonte se encuentran los microfósiles carbonatados marinos, mientras que la parte superior está conformada solo por calcita neoformada, que se encuentra en las estructuras bandeadas y también forma rellenos de calcita acicular en algunos poros (Figura 2).

Adicionalmente, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los carbonatos en el estrato superior son muy negativos (hasta -10), lo que corresponde con los carbonatos pedogénicos precipitados bajo los ecosistemas dominados por las plantas C3. Los valores del estrato superior difieren bruscamente de las firmas isotópicas en las calizas subyacentes que son mucho más positivas. Basados en estos resultados, se interpretaron los carbonatos del estrato superior como pedogénicos y al estrato en general - horizonte petrocálcico.

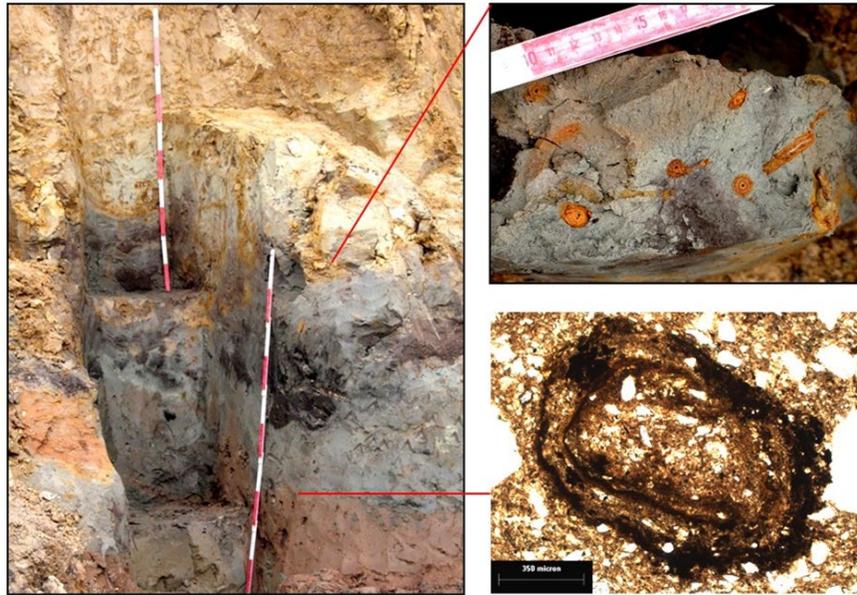


Figura 1 Macro-, meso- y micromorfología del horizonte gléyico relicto en el perfil de Retisol en Koskovo, cuenca superior de Volga, Rusia.

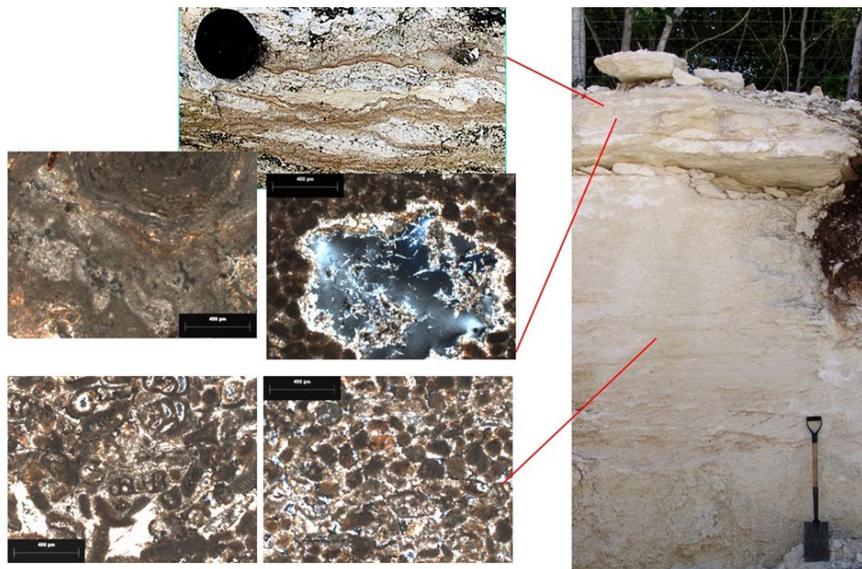


Figura 2 Micromorfología de horizontes carbonatados de un Leptosol Réndzico en Quintana Roo. Rasgos pedogestructura bandeada y neoformación de calcita acicular en horizonte Bk - petrocálcico. Rasgos sedimentarios en horizonte C: microfósiles marinos y estructura de pellets.

Los fechamientos de U/Th produjeron edades entre 70 y 90 mil años antes del presente que corresponden al estadio isotópico marino 4 y las fases finales del estadio 5 – las primeras épocas frías del pleistoceno tardío después de la fase cálida del interglacial anterior (estadio isotópico 5e). Entonces el horizonte petrocálcico es un relictos del inicio de la época fría del pleistoceno tardío que indica un paleoclima semiárido en esta época.

CONCLUSIONES

En diferentes zonas geográficas los rasgos relictos pleistocénicos están presentes en los perfiles de suelos superficiales. En algunos casos estos fenómenos relictos forman horizontes diagnósticos que influyen en la definición taxonómica de estos suelos. La micromorfología proporciona una herramienta eficiente para identificar e interpretar correctamente los rasgos relictos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece profundamente la colaboración de los colegas del Grupo de Paleosuelos del Instituto de Geología, UNAM, con quien el autor ha estudiado los paleosuelos pleistocénicos en varias partes del mundo durante más de 20 años.

BIBLIOGRAFÍA

Stoops, G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America, Madison, WI.

RETOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN DE N₂O DE SUELOS AGRÍCOLAS

Blanca González Méndez^{1*}; Christina Siebe²

¹ CONACYT-Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste, 83000, Sonora, México. *blancagm@geologia.unam.mx; ² Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 04350, CDMX

RESUMEN

Los suelos agrícolas contribuyen a las emisiones del sector AFOLU (*agriculture, forestry and other land use*), que representan poco menos de ¼ de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI). El óxido nitroso (N₂O) es un GEI con un potencial de calentamiento 300 veces mayor al CO₂, por lo que la reducción de sus emisiones en el sector agrícola representa una estrategia de mitigación del cambio climático. Se requiere estimar los factores de emisión (FE) para integrar los inventarios nacionales y determinar estrategias de mitigación. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) establece un valor predeterminado de FE de 0.01 kg N-N₂O/kg de nitrógeno adicionado que se utiliza cuando se carece de datos que permitan estimar un FE específico. Aquí, se analizan los desafíos de muestreo, analíticos y de estimación que limitan el cálculo de los FE de N₂O. Se analiza la importancia del cálculo específico de los FE, a través de un estudio de caso donde el riego con aguas residuales en el Valle del Mezquital en el centro de México, promueve emisiones directas de N₂O durante el riego por inundación. En este tipo de agroecosistemas el FE es hasta 3 veces menor que el valor predeterminado del IPCC, lo que implica que en el cálculo de los inventarios nacionales al usar el valor del IPCC incrementará las emisiones estimadas nacionales, por lo que es importante superar los retos para la cuantificación de emisiones directas del N₂O y alentar la estimación de FE específicos.

PALABRAS CLAVE: *Cámara estática cerrada; Emisiones directas; Factores de emisión; Óxido nitroso.*

INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector AFOLU (*agriculture, forestry and other land use*) están asociadas con las actividades de ganadería, agricultura, cambios en el uso de suelo y quema de biomasa. De acuerdo con el IPCC (2014), el sector AFOLU es responsable de poco menos de ¼ parte de las emisiones antropogénicas de GEI, principalmente debido a la deforestación y las emisiones de los suelos agrícolas y la ganadería.

Como el N₂O es un gas con un potencial de calentamiento 300 veces mayor al CO₂ (Griffis et al., 2017), una de las opciones de mitigación dentro del sector AFOLU es la reducción de las emisiones de N₂O de las tierras de cultivo. Lo cual implica mejorar la eficiencia de producción mediante la implementación de nuevas prácticas que permitan disminuir las emisiones por unidad de producto agrícola (IPCC, 2014). La implicación es

que las emisiones de GEI se deben cuantificar para estimar dicha eficiencia y esto se expresa a través de los factores de emisión (FE), que son coeficientes que cuantifican las emisiones de un gas por unidad de actividad.

El N₂O se produce en los suelos durante los procesos de nitrificación y desnitrificación de los fertilizantes y mejoradores (inorgánicos y orgánicos) aplicados. De acuerdo con el IPCC (2019 y 2006), alrededor del 1% del N aplicado será emitido directamente como N₂O (FE=0.001 kg N-N₂O/kg N). Este valor predeterminado de FE fue estimado considerando diversas emisiones de agroecosistemas templados (Stehfest y Bouwman, 2006; Bouwman et al., 2002), con una baja representación de datos provenientes de otro tipo de ambientes (Albanito et al., 2017). Dado que dicho valor del 1% no captura todas las variaciones a través de las diversas regiones climáticas y las prácticas agrícolas, el IPCC alienta el uso de datos desagregados que permitan especificar la información local o regional mediante el uso de las ecuaciones Tier 1, Tier 2 y Tier 3. Con base en lo anterior, se analiza la importancia del cálculo específico de los FE, a través de un estudio de caso en el Valle del Mezquital, y se discuten los retos para estimar dichos FE específicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de caso corresponde a la estimación de los FE para un suelo agrícola regado con aguas residuales en el Valle del Mezquital (VM), Hidalgo. Los datos específicos de cuantificación y estimación de los FE se encuentran en González-Méndez et al. (2020). La región posee un clima semiseco templado con lluvias en verano (junio a septiembre). La temperatura media anual es de 16 a 18°C con una precipitación media de 400 a 700 mm y una evapotranspiración potencial anual de 2100 mm. El VM contiene el más grande y uno de los más antiguos sistemas de riego agrícola con aguas residuales del mundo. El agua residual (AR) se distribuye a través de un complejo sistema de presas de almacenamiento y canales, y se colecta en drenajes agrícolas en la parte baja del sistema. El riego se realiza por inundación, con láminas medias anuales de 1500 a 2200 mm. Los autores escogieron una parcela de 2.43 ha (20°07' N, 99°13' W) y cuantificaron las emisiones durante 21 riegos consecutivos (≈2 años), siguiendo la rotación alfalfa-rye grass- maíz. En la parcela instalaron 12 cámaras estáticas (50x50x15 cm), y monitorearon las emisiones durante 7 días en cada riego, distribuidos antes y durante el riego, 1, 2, 3 y 7 después del riego. En cada medición se tomaron muestras de aire del suelo en viales evacuados cada 10 minutos, durante 30 minutos para estimar los flujos de emisión. La cuantificación de GEI se realizó por cromatografía de gases (Shimadzu, GC 2014), equipado con detector de ionización de flama (FID), un detector de captura de electrones (ECD), y un metanizador. Con una columna de acero inoxidable 5m x ¼", empacada con Haye Sep Q 80/100, utilizando Ar como gas acarreador. Para el cálculo de los flujos de emisión ajustaron un modelo lineal. Dado que las mediciones fueron realizadas consecutivamente en las mismas cámaras se utilizó un modelo lineal mixto para mediciones repetidas y datos no balanceados, cuyas diferencias entre cámaras, fueron analizadas por métodos de máxima verosimilitud (REML). Como no se encontró variación espacial entre las cámaras se estimó la media aritmética de los flujos de emisión (F) de los mg N-N₂O /m² día de las

12 cámaras por cada uno de los 6 días de muestreo (antes, durante, 1, 2, 3 y 7 días después del riego). Se utilizó interpolación lineal para llenar los días sin medición de flujos (Ft) en la serie de tiempo. Los valores de F y Ft (medias y datos interpolados) se integraron para obtener los flujos acumulativos (Fcum,t) en el tiempo t (mes), que representan las emisiones directas de N₂O. Luego se utilizó la ecuación Tier 1 desagregada para obtener los FE de cada cultivo de acuerdo con $FE = F_{cum, t} / N_{agregado}$. Con el FE predeterminado por el IPCC (1%, 2019) se calcularon las emisiones directas de N-N₂O para determinar cuánto se sub o sobreestiman los flujos acumulativos de N₂O, utilizando la siguiente ecuación: $N-N_2O \text{ directo} = N_{agregado} * 0.001$, y se compararon con los flujos reales medidos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El cuadro 1 muestra los FE estimados para cada cultivo, los FE anuales (rotación alfalfa-rye grass y rye grass-maíz), así como las emisiones directas reales (medidas en campo) y las estimadas utilizando el valor predeterminado del IPCC (2019). Se observa que los FE específicos son menores al valor predeterminado del IPCC, excepto para el maíz, ya que este cultivo es el único que recibe fertilización sintética de 100 kg N/ha. Las emisiones directas estimadas con el valor del 1% del IPCC, sobreestiman las emisiones reales medidas en campo. Lo anterior demuestra la importancia de estimar los FE específicos.

Desafíos para la estimación de FE específicos

La estimación de FE específicos requiere mediciones continuas de las emisiones directas de N₂O a nivel de campo, que permitan construir una base de datos con las emisiones anuales. Se debe asegurar de capturar los momentos clave en las emisiones, por ejemplo, el riego, la aplicación de fertilizantes, la variación de temperatura, la adición de lluvias, el tipo de suelos, etc. Lo que implica que las emisiones tienen variabilidad espacial y temporal y que la cuantificación de las emisiones debe considerar dichas variaciones.

Cuadro 1. FE y emisiones directas de N-N₂O medidas en campo y estimadas considerando el valor predeterminado del IPCC (2019). Tomado de González-Méndez et al. (2020).

| Cultivo | FE específico Kg N-N ₂ O/kg N | Kg N-N ₂ O directo (Medido en campo) | Kg N-N ₂ O directo Con FE del IPCC |
|-------------------|---|--|--|
| Alfalfa | 0.004 (0.004–0.004) | 5.37 (4.63–6.12) | 14.22 (3.84–46.65) |
| Rye grass | 0.001 (0.001–0.001) | 3.45 (2.92–3.97) | 27.69 (8.03–87.29) |
| Maíz | 0.010 (0.008– 0.012) | 18.33 (13.25–23.41) | 17.79 (5.22–57.34) |
| Alfalfa-rye grass | 0.003 (0.003–0.003) | 8.50 (7.44–9.55) | 26.186 (87.13–86.54) |
| Rye grass-maíz | 0.004 (0.003–0.005) | 18.65 (13.57–23.73) | 43.824 (13.03–135.43) |

Selección de la técnica de muestreo y método de cuantificación

Uno de los primeros desafíos es la selección de la técnica de muestreo, lo cual depende en gran medida tanto de los objetivos, de la escala de trabajo y de los recursos disponibles. Para escalas a nivel de parcela, un método clásico es el muestreo de las emisiones mediante la instalación de cámaras cerradas (que pueden ser estáticas o dinámicas), donde el diseño de muestreo permite colocar tantas cámaras como condiciones específicas a muestrear se requieran. A mayor tamaño de la cámara, se integrará mejor la variabilidad espacial de las emisiones; sin embargo, la mayor parte de las mediciones están limitadas a menos de 1m² (Liang et al., 2018). La cámara cerrada es una técnica sencilla, de bajo costo cuya principal desventaja es la creación de artefactos en la medición al momento de cerrar la cámara (Venterea et al., 2010).

Las muestras obtenidas se pueden analizar mediante cromatografía de gases (CG), FTIR portátil (espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier) para la cuantificación in situ. Las desventajas de la CG es que se consume mucho tiempo en el análisis y es costosa, la ventaja es que se pueden tomar muestras simultáneamente, lo que permite estudiar más de un sitio a la vez. Mientras que el FTIR es práctico y sólo requiere un gas para la calibración del background, pero sólo se puede medir una cámara a la vez.

A escala de ecosistema el Eddy Covariance (EC) es uno de los métodos más utilizados principalmente para la medición del CO₂ y el CH₄. Así como las técnicas de percepción remota (Fieuzal et al., 2020).

Selección del modelo para estimar los flujos de emisión

Tradicionalmente, los flujos de emisión se estiman mediante el ajuste de modelos lineales a las mediciones realizadas en las cámaras cerradas. No obstante, se ha demostrado que no todas las mediciones siguen un comportamiento lineal, por lo que se han implementado otros modelos como el modelo de regresión de Hutchinson-Mosier (HMR), regresión cuadrática (QR) y estimadores de flujo difusivos para estados no estáticos (NDFE), los cuales suelen presentar altas incertidumbres cuando se tienen flujos pequeños. Por lo que no se pueden aplicar directamente a las bases de datos, sino que se debe decidir cuál modelo ajusta mejor para cada set de datos de cada cámara. Así, el segundo desafío es escoger el mejor modelo para estimar los flujos de emisión obtenidos con las cámaras estáticas (Huppi et al., 2018).

Selección de la técnica para estimar los datos faltantes en la serie de tiempo

Frecuentemente las mediciones se realizan una vez al mes, a la semana, etc. generando series de tiempo incompletas, a los que se les requiere aplicar diversas técnicas de relleno (gap-filling techniques, GFT) (Taki et al., 2018). Esto representa el tercer desafío, estimar los datos faltantes para construir las emisiones acumulativas y estimar los FE.

Entre las GFT más comunes se encuentra la interpolación lineal, la media móvil, look-up tables (LUT) y más recientemente redes neuronales artificiales (AAN). Las medias

móviles son de gran utilidad cuando los vacíos están cercanos en tiempo, no así para estimar períodos más largos (Mishurov y Kiely, 2011).

CONCLUSIONES

Aunque el proceso para obtener un FE específico es laborioso, es importante estimarlos, dado que los factores predeterminados por el IPCC pueden sobreestimar las emisiones directas de un agroecosistema. Esto es particularmente cierto para suelos manejados con climas más cálidos y menos húmedos, como los ambientes semiáridos. Para la estimación de estos FE se sugiere que se consideren las capacidades analíticas y recursos económicos disponibles, lo cual puede resultar en una combinación de técnicas de análisis (CG, FTIR, Eddy covariance, etc) que permitan integrar la variabilidad espacial y temporal de los datos. De igual forma, la estimación de los flujos requiere una combinación de técnicas de estimación (lineal, cuadrática, etc) y de técnicas de relleno (interpolación, LUT, AAN, etc.), por lo que el investigador debe planificar cuidadosamente el tipo de datos que requiere en cada fase para poder estimar de forma robusta los FE específicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Albanito, F., Lebender, U., Cornulier, T., Sapkota, T.B., Brentrup, F., Stirling, C., Hillier, J. (2017). Direct nitrous oxide emissions from tropical and sub-tropical agricultural systems - a review and modelling of emission factors. *Sci. Rep.* 7, 1-12. <https://doi.org/10.1038/srep44235>.
- Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., (2002). Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 28-1-28-9. doi: <https://doi.org/10.1029/2001gb001812>
- Fieuzal, R., Sicre, C.M., Tallec, T. (2020). Towards an improved inventory of N₂O emissions using land cover maps derived from optical remote sensing images. *Atmosphere* 11(11), 1188. <https://doi.org/10.3390/atmos11111188>
- González-Méndez, B., Ruiz-Suárez, L.G., Siebe, C. (2020). Emission factors from a wastewater irrigated land in a semiarid environment in Mexico. *Science of the total environment*, 709, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136177>
- Griffis, T.J., Chen, Z., Baker, J.M., Wood, J.D., Millet, D.B., Lee, X., Venterea, R.T., Turner, P.A. (2017). Nitrous oxide emissions are enhanced in a warmer and wetter world. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 12081-12085. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704552114>.
- Huppi, R., Felber, R., Krauss, M., Six, J., Leifeld, J., FuB, R. (2018). Restricting the nonlinearity parameter in soil greenhouse gas flux calculation for more reliable flux estimates. *Plos One*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200876>
- IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11: N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. pp. 11.1-11.54.
- IPCC (2019). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11: N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application.
- IPCC (2014). WGII IPCC Adaptation Policy Makers.
- Liang, L. L., Campbell, D.I., Wall, A.M., Schipper, L.A. (2018). Nitrous oxide fluxes determined by continuous eddy covariance measurements from intensively grazed pastures: temporal patterns and

environmental controls. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 268, 171-180, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.09.010>

Mishurov, M., Kiely, G. (2011). Gap-filling techniques for the annual sums of nitrous oxide fluxes. *Agric. For. Meteorol.* 151, 1763-1767. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.014>.

Stehfest, E., Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 74, 207-228. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9000-7>.

Taki, R., Wagner-Riddle, C., Parkin, G., Gordon, R., Vander Zaag, A. (2018). Comparison of two gap-filling techniques for nitrous oxide fluxes from agricultural soil. *Can. J. Soil Sci.* 99, 12-24. <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0041>.

Venterea, R.T. (2010). Simplified method for quantifying theoretical underestimation of chamber-based trace gas fluxes. *Journal of Environmental quality*, 39, 126-135.

TRANSECTO GEOPEDOLÓGICO EN UNA PLANICIE ALUVIAL DE TABASCO, MÉXICO

Antonio López-Castañeda¹; Joel Zavala-Cruz^{1*}; David Jesús Palma-López¹; Francisco Bautista²; Joaquín Alberto Rincón-Ramírez¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina S/N, 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México; ²Centro de Investigación en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, 58190 Morelia, Michoacán, México. *zavala_cruz@colpos.mx

RESUMEN

Los estudios de suelos proveen información básica para la planificación territorial y contribuyen a enfrentar desafíos como la demanda de alimentos y la degradación ambiental. Sin embargo, la mayor superficie de México carece de levantamientos semidetallados y detallados de suelos, lo que dificulta la toma de decisiones para promover usos agropecuarios y cultivos en suelos aptos. El objetivo del trabajo fue analizar la relación de las formas del terreno y suelos en un transecto sobre una planicie aluvial de Tabasco. Se trazó un transecto topográfico sobre un mapa de formas del terreno aluviales con dirección NE-SW, en sentido perpendicular a la dirección de los cauces, y se sobrepuso a un modelo digital de elevación (MDE). Las formas del terreno se identificaron con base en el enfoque geopedológico. En cada forma del terreno se describió más de un perfil de suelo y se muestreó por horizontes. Los análisis de laboratorio se basaron en la NOM-021-RECNAT-2000 y la clasificaron se hizo con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2015. Desde una posición topográfica alta a baja, resalta la secuencia de unidades geopedológicas: Fluvisols (FL) y Cambisols (CM) en albardón de río, Vertisols (VR) en napa de desborde, y Gleysols (GL) en cubeta de decantación y cauce colmatado. En la misma secuencia, sobresalen los calificadores primarios Fluvic, Eutric y secundarios Clayic, Humic y Gleyic. Las unidades geopedológicas detectadas en el transecto, evidencian una distribución geográfica de los suelos controlada por las formas del terreno y los sedimentos no consolidados de la planicie aluvial.

PALABRAS CLAVE: *Aluviones; Formas de terreno; Toposecuencia de suelos*

INTRODUCCIÓN

El enfoque geopedológico se ha proyectado como alternativa viable para acelerar la cartografía de suelos, combinando criterios geomorfológicos y pedológicos (Zinck, 2012; Michaud et al., 2013). Se basa en un sistema categórico para la clasificación de geoformas a distintas escalas, con información geomorfológica y de suelos; el nivel de forma del terreno corresponde a la escala más detallada (Zinck, 2012). La geomorfología proporciona las unidades de mapeo, facilita la localización de sitios de muestreo y el análisis de los patrones de distribución geográfica de los suelos (Zinck, 2012; Frugoni et al., 2016), utiliza técnicas de levantamiento, fotointerpretación, trabajo de campo y diseño de mapas (González et al., 2009). La pedología suministra los componentes taxonómicos y morfológicos de las unidades de mapeo y analiza la distribución de los suelos en el

paisaje (Zinck, 2012). El análisis en transecto incluye una secuencia de suelos en varias topoformas (Cajuste-Botemps y Gutiérrez, 2011), y el estudio de perfiles de suelos en transectos sobre formas del terreno, auxilian en la cartografía de suelos a escala detallada (Zinck, 2012).

Entre las aportaciones del enfoque geopedológico sobresalen la cartografía de suelos y evaluaciones agropecuarias a diversas escalas en estados del sureste de México (Zavala-Cruz et al., 2016; Palma-López et al., 2017). El objetivo del trabajo fue analizar la distribución de los suelos en un transecto geopedológico sobre una planicie aluvial del estado de Tabasco, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza al oeste del estado de Tabasco, en los municipios de Huimanguillo y Cárdenas, entre las coordenadas geográficas 17°53'6.34" y 18°00'31.21" LN, y 93°36'37.61" y 93°44'25.77" LO. Tiene clima Am (f) cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, la precipitación anual varía de 2400 a 2600 mm, y la temperatura media anual oscila de 24 a 28 °C. La mayor área corresponde a la planicie aluvial inactiva del río Mezcalapa, y la porción activa al río Zanapa; la altura varía de 1 a 15 msnm, y la pendiente oscila entre 1 y 3%. El uso dominante es de pastizal cultivado, seguido de cultivos (cacao, caña de azúcar, maíz y frijol) y vegetación secundaria (López-Castañeda et al., 2022).

Se trazó un transecto topográfico en una planicie aluvial identificada en un mapa de formas de terreno (López-Castañeda et al., 2022) y se sobrepuso en un MDE (INEGI, 2011), en sentido perpendicular a un cauce colmatado y el río Zanapa, al oeste de Tabasco.

Se describieron 14 perfiles de suelo a 1.5 m de profundidad (Cuanalo, 1990), tomando en cuenta la variabilidad de las formas del terreno aluviales. En cada horizonte se colectó 1.5 kg de suelo y se depositó en bolsas de polietileno. Los análisis físicos y químicos de suelos se realizaron en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas (LASPA), del COLPOS Campus Tabasco, siguiendo la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Para cada horizonte se determinaron las siguientes propiedades físicas y químicas: textura por el método de hidrómetro de Bouyoucos, densidad aparente (DA) por el método del terrón parafinado, pH medido con cloruro de potasio (1:2.5), pH mediante potenciometría en agua (1:2), conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación de un suelo por medición electrolítica, materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, bases intercambiables (K, Ca, Mg, Na) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante extracción con acetato de amonio 1N, nitrógeno total (N) mediante Semi-micro Kjeldahl, y fósforo extraíble (P) por el procedimiento de P-Olsen. Los suelos se clasificaron utilizando la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) (Grupo de Trabajo WRB, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el transecto sobre la planicie aluvial en estudio, se identificaron cuatro grupos y 14 unidades de suelo, sobre seis formas de terreno (Figura 1). En cada forma de terreno se desarrolla uno a dos grupos de suelo, y las unidades varían dentro de cada grupo y entre

los grupos. Por su extensión en el transecto, dominan los suelos Vertisols (VR) y Cambisols (CM), seguidos de Geysols (GL) y Fluvisols (FL). Estos suelos se caracterizan por ser profundos, poco desarrollados, con horizontes A/C, excepto los CM que presentan un horizonte Bw. La mayoría de las unidades denotan calificadores principales y suplementarios Eutric, Fluvic, Clayic y Humic, debido al origen aluvial reciente, por consiguiente, son ricos en nutrientes, arcillosos y con buen contenido de materia orgánica.

El transecto topográfico en sentido perpendicular a los cauces colmatado al NE, y activo al SW, desde topografía alta a baja, denota que los suelos guardan estrecha relación con las formas del terreno y los sedimentos aluviales, mostrando la siguiente secuencia: FL, CM, VR y GL (Figura 1). Los FL y CM se desarrollan en albardones de río altos y bajos (Ara y Arb) e islas aluviales (Ia), tienen forma convexa y se ubican entre 6 y 14 msnm, en la posición topográfica más alta de la planicie aluvial, por consiguiente, exhiben buen drenaje interno asociado a capas con material aluvial (calificador Fluvic) y arcilloso (calificador Clayic), y textura arcillo arenosa en capas subyacentes. Los CM sobre Arb ubicados en alturas intermedias, muestran gleyzación (calificador Gleyic) entre 32 y 120 cm de profundidad.

Los VR concuerdan con la napa de desborde (Nd) y algunos Arb situados en zonas de transición entre Ara y cubetas de decantación (Cd); tienen textura arcillosa en los primeros horizontes y arcillo arenosa en las capas subyacentes, buen drenaje en el horizonte A, y gleyzación a 70 cm de profundidad, por efecto de la topografía plana situada entre 5 y 7 msnm, y la textura fina, lo que favorece encharcamientos y la elevación del manto freático en la época de lluvias.

Los GL coinciden con geoformas de Cd y cauce colmatado (Cc), la primera se sitúa cerca del río Zanapa en la posición topográfica más baja de la planicie aluvial (1 a 5 msnm), y la segunda se localiza entre albardones de río; ambas tienen forma cóncava y sedimentos arcillosos en todo el perfil, lo que favorece la acumulación de los escurrimientos superficiales y la elevación del manto freático hasta la superficie del horizonte A, y junto con las inundaciones recurrentes del río Zanapa, mantienen el exceso de humedad durante seis meses al año, lo que incide en la gleyzación de todo el perfil (Figura 1).

En la línea del transecto sobre las geoformas aluviales estudiadas, la secuencia de suelos FL, CM, VR y GL, difiere respecto a lo reportado en otros estudios, Palma-López et al. (2017) encontró VR y CM, e INEGI (2013) identificó VR y GL; ambos trabajos omiten FL.

Otros estudios (Zavala-Cruz et al., 2016; Brindis-Santos et al., 2020; Herrera-Romero et al., 2020) reportan CM, FL y GL asociados a planicies aluviales de Tabasco y Nayarit. En el transecto, sobresalen los VR por su amplia superficie, textura arcillosa, buena fertilidad y limitantes similares a lo encontrado en otras planicies aluviales (Ghosh et al., 2010; López-Castañeda et al., 2017; Pérez et al., 2017; Thuo et al., 2020). En general, los grupos

de suelos encontrados presentan uso intensivo en estrecha relación con su buen potencial agrícola (Thuo et al., 2020). Los suelos del transecto, al ubicarse en el Plan Chontalpa, han sido drenados mediante canales para mitigar las limitaciones por manto freático y encharcamiento, y aumentar el potencial agrícola (Sánchez, 2007).

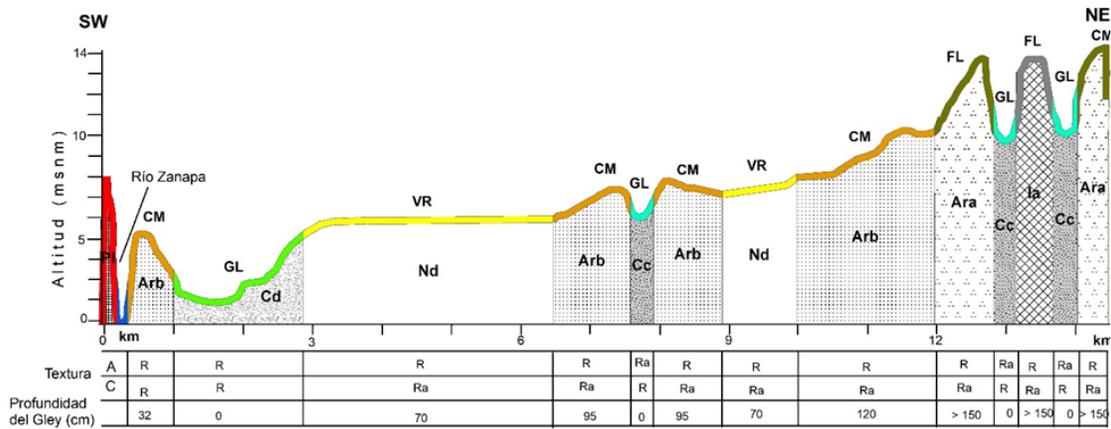


Figura 1. Transecto geopedológico en una planicie aluvial de Tabasco. Formas del terreno: Cc Cauce colmatado, Ia Isla aluvial, Ara Albardón de río alto, Arb Albardón de río bajo, Nd Napa de desborde, Cd Cubetas de decantación. Textura: R arcillosa, Ra Arcillo arenosa.

CONCLUSIONES

El transecto geopedológico en una planicie aluvial situada al oeste de Tabasco, denota una secuencia de grupos de suelos FL, CM, VR y GL, controlada por las formas del terreno y el material parental, desde posiciones topográficas altas a bajas.

Las unidades geopedológicas encontradas fueron: FL y CM en albardones de río, VR en napas de desborde, y GL en cubetas de decantación y cauces colmatados. Estas unidades son clave para la cartografía detallada de suelos en la planicie fluviodeltaica del río Mezcalapa en Tabasco.

BIBLIOGRAFÍA

- Brindis-Santos, A.I., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Mata-Zayas, E.E., López-Bustamante, Y.I. (2020). Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en planicies y terrazas de Tabasco, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72, 1-17. <http://dx.doi.org/10.18268/>
- Cajuste-Botemps L., Gutiérrez C.M.C. (2011). El factor relieve en la distribución de los suelos en México. En: Krasilnikov P, Jiménez-Nava FJ, Reyna-Trujillo T, García-Calderón N.E. (Eds). Geografía de suelos de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México. 462 p.
- Cuanalo de la C.H. (1990). Manual de descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a edición. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 75 p.
- Frugoni, M.C., González, M.R., Falbo, G., Zapiola, D. (2016). La geopedología como base para zonificar la aptitud forestal en una cuenca del noroeste de la Patagonia Argentina: Boletín Geográfico, 38, 29-48.
- Ghosh, S., Lockwood, P., Hulugalle, N., Daniel, H., Kristiansen, P., Dodd, K. (2010). Changes in properties of sodic Australian Vertisols with application of organic waste products: Soil Science Society of America Journal, 74, 153-160.

- González, G.S.A., Bojórquez, S.J.I., Nájera, G.O., García, P.J.D., Madueño, M.A., Flores, V.F. (2009). Regionalización ecológica de la llanura costera norte de Nayarit, México: *Investigaciones Geográficas*, 69, 21-32.
- Herrera-Romero, J.A., Bojórquez-Serrano, J.I., Hernández-Jiménez, A., Can-Chulim, A. (2020). Geomorfoedaphological landscapes and regularities of soil distribution in San Blas Nayarit, Mexico: *Revista Bio Ciencias*, 7, e706.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2013). Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250000, serie II (continuo nacional). Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2011). Modelo digital de elevación E15C17C, E15C17F, E15C18A, E15C18B, E15C18D, E15C18E. Tamaño de pixel de 5 m: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- IUSS Working Group (WRB). (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps: *World Soil Resources Reports*, n. 106: Rome, 192 p.
- López-Castañeda, A., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Ortiz-Solorio, C.A., Tinal-Ortiz, S., Valdez-Lazalde, J.R. (2017). Cartografía de suelos en la región de los ríos, Tabasco, México; uso del modelo digital de elevación: *Agroproductividad*, 10, 22-28.
- López-Castañeda, A., Zavala-Cruz, J., Palma-López, D.J., Bautista-Zuñiga, F., Rincón-Ramírez, J.A. (2022). Formas del terreno a escala detallada en planicies y lomeríos del Municipio de Huimanguillo, Tabasco, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*
- Michaud, G.A., Monger, H.C., Anderson, D.L. (2013). Geomorphic-vegetation relationships using a geopedological classification system, northern Chihuahuan Desert, USA: *Journal of Arid Environments*, 90, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.001>
- Palma-López, D.J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zuñiga, F., Gavi-Reyes, F., Palma-Cancino, D.Y. (2017). Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Tabasco: *Agroproductividad*, 10, 29-35.
- Pérez, A.B., Ortega, A.L., Molina, L.G., Barrientos, C.E.R., Bautista-Cruz, A. (2017). Efecto de las prácticas de agricultura de conservación en algunas propiedades químicas de los Vertisoles: *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8, 759-772.
- Sánchez, J.M.P. (2007). El manejo de los recursos naturales bajo el modelo Agrícola de camellones chontales en Tabasco: *Iberofórum. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana*, 2, 1-9.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT), Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000 (2002). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios muestreos y análisis Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 75 p.
- Thuo, A.K., Karuku, G.N., Kimenju, J.W., Kariuki, G.M., Wendot, P.K., Melakeberhan, H. (2020). Factors influencing the relationship between nematode communities and edaphic factors on selected soil groups in Kenya: Vertisols, Cambisols and Arenosols: *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23, 2.
- Zavala-Cruz, J., Morales-Garduza, M.A., Vargas-Villamil, L.M., Palma-López, D.J., Ortiz-Solorio, C.A., (2016). Capacidad de uso del suelo urbano en planicies fluviales costeras: el caso de Villahermosa, Tabasco, México: *Interciencia*, 41, 296-304.
- Zinck, A.J. (2012). Geopedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgo naturales, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 123 p.

UNIDADES DE SUELO-GEOFORMA-LITOLOGÍA CON AGAVE PULQUERO EN LA REGIÓN POBLANO-VERACRUZANA

Joel Zavala-Cruz¹; Ángel I. Ortiz-Ceballos^{2*}; Edgar Shirma-Tórres; Rogelio Lara-González²

¹Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina S/N, 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México; ²Universidad Veracruzana, Campus para la Cultura, las Artes y el Deporte. Av. Culturas Veracruzananas 101, Col. Emiliano Zapata. 91090 Xalapa, Veracruz, México.*angortiz@uv.mx

RESUMEN

El agave pulquero (*Agave salmiana* sp. *Salmiana*) es notable por la producción de pulque, generación de alimentos, tiene potencial forrajero y contribuye con servicios ecosistémicos como conservación de suelos, aportación de nutrimentos y captura de carbono. Sin embargo, la información sobre los suelos en que se desarrolla la planta, es escasa. El estudio tuvo como objetivo, analizar información de geoformas y suelos de la región de agave pulquero poblano-veracruzano, e identificar las unidades de suelo-geoforma-litología con mayor uso del cultivo. El análisis se basó en información de un levantamiento semidetallado de suelos mediante el enfoque geopedológico. Las propiedades físicas y químicas de 26 perfiles de suelos se determinaron siguiendo la NOM-021-RECNAT-2000, y la clasificación se apoyó en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2007. Se identificaron siete grupos y 18 unidades de suelos, destacan Regosoles, Leptosoles y Arenosoles en el 87% de la región. Las unidades más notables son Regosol Háptico y Léptico, Leptosol Hiperesquelético y Réncico y Arenosol Prótico. Se identificaron cuatro unidades de suelo-geoforma-litología con mayor cultivo de agave pulquero: 1) Regosol Háptico y Arenosol Prótico en terraza sobre toba riolítica y pumicita con pendiente de 2 a 5%; 2) Regosol Háptico (Éutrico) y Regosol Léptico (Éutrico) en piedemonte en dacita, pumicita y caliza con pendiente de 2 a 10%; 3) Regosol Háptico en ladera en toba riolítica y caliza con pendiente de 14 a 16%; y 4) Regosol Háptico en colada de basalto intemperizado con pendiente de 1 a 5%.

PALABRAS CLAVE: *Suelos de ladera; Suelos de piedemonte; Suelos de planicie; Suelos de terraza.*

INTRODUCCIÓN

La región de agave pulquero poblano-veracruzano presenta importantes superficies donde se intercalan diversos cultivos con plantaciones de *Agave salmiana* sp. *salmiana*. Dicho cultivar sobresale por la producción de la bebida tradicional conocida como pulque de *Agave salmiana*, la panta produce el agua miel materia prima en la elaboración del pulque, también se usa para elaborar barbacoa y mixiote, y presenta potencial como forraje y hábitat de larvas de insectos (gusanos) que se consumen como alimento (Colunga-García et al., 2007; García-Herrera et al., 2010; Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013; Aguilar et al., 2014). Además, contribuye con servicios ecosistémicos mediante conservación de suelos, captura de carbono y aportación de nutrimentos al suelo (García-Herrera et al., 2010, Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013).

No obstante, la importancia del agave pulquero, la información sobre los suelos en que se desarrolla, es escasa (García-Herrera et al., 2010; García-Moya et al., 2011; Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013). *Agave salmiana* sp. *salmiana* prospera en suelos Regosoles, Fluvisoles y Andosoles de las regiones semiáridas a templadas de México (García-Mendoza, 2011; Mora-López et al., 2011; Reynoso-Santos et al., 2012).

En este trabajo se analiza información de geoformas y suelos de la región de agave pulquero poblano-veracruzano, y se proponen las unidades de suelo-geoforma-litología con mayor cultivo de la planta. Esta información puede ayudar a promover el cultivar y coadyuvar a la conservación de suelos y servicios ecosistémicos, además de generar beneficios económicos a los productores agrícolas en áreas similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

La región de agave pulquero poblano-veracruzano, se localiza a 15 km al suroeste de la ciudad de Perote, entre las coordenadas geográficas: 19° 23' 19" y 19° 34' 15" LN, y 97° 10' 58" y 97° 26' 32" LW, a una altura entre 2328 y 3430 metros sobre el nivel del mar (msnm). Tiene una superficie de 16527.6 ha que pertenecen a los ejidos San Antonio Tenextepec, La Gloria y San José Alchichica, estados de Veracruz y Puebla. El clima varía de seco templado y semifrío seco a templado semifrío húmedo, con temperatura media de 11 a 13 °C y precipitación media de 399 a 482 mm. Se cultiva trigo, cebada, maíz y agave pulquero (Lorenzo-Sacramento, 2012; Ortiz-Ceballos y Lara-González, 2014).

El estudio se basó en un levantamiento semidetallado de suelos, en el cual se generaron mapas de geomorfología y suelos a escala 1:50000 basados en el enfoque geopedológico (Zinck, 2012). Se describieron 26 perfiles de suelos hasta 1.5 m de profundidad o hasta la roca madre, en transectos considerando la diversidad de geoformas (Ortiz-Ceballos y Lara-González, 2014).

Las propiedades físicas y químicas (textura, pH, CE, MO, N, P, bases intercambiables, CIC) se determinaron siguiendo la NOM-021-REC/NAT-2000 (SEMARNAT, 2002). La clasificación de suelos se apoyó en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2007). Además, se verificaron 35 sitios en suelos cultivados con agave pulquero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La región de agave pulquero poblano-veracruzana tiene siete grupos y 18 unidades de suelos. Destacan los grupos Regosol (61.4%), Leptosol (17.1%) y Arenosol (8.9%); otros grupos (Solonchakz, Solonetz, Phaeozems y Fluvisoles) comprenden el 10.8% de la región. Las unidades de suelos más notables son Regosol Háptico y Léptico (61.2%), Leptosol Hiperesquelético y Réncico (17.2%) y Arenosol Prótico (8.9%). En seguida se describen los suelos, geoformas y litología con agave pulquero.

Suelos en planicie palustre y lacustre con pendiente menor a 1%

Sobresalen las unidades Solonchak Gléyico y Solonetz Vértico Gléyico Sálico, con calificador Arcílico. Sostienen pastos halófitos y en menor área el cultivo de romerito. No se cultiva agave pulquero.

Suelos en planicie fluvial con pendiente de 1 a 2%

Prevalece la unidad Fluvisol Háptico con calificadores Arénico y Éutrico. El Regosol Léptico se ubica en valles erosivos. El Fluvisol sostiene cultivos de maíz y frijol. No se cultiva agave pulquero.

Suelos en terraza sobre toba riolítica y pumicita con pendiente de 2 a 5%

Domina la unidad Regosol Háptico, seguida del Arenosol Prótico, ambas con calificador Éutrico. En los dos suelos se cultiva maíz, frijol, haba y agave pulquero. El maguey se maneja como cerco vivo en los linderos entre las parcelas.

Suelos en piedemonte en dacita, pumicita y caliza con pendiente de 2 a 32%

En piedemontes con pendiente suave a media (2 a 10%), prevalece la unidad Regosol Háptico (Éutrico), seguida del Regosol Léptico (Éutrico). Ambos suelos sustentan cultivos de maíz, frijol, haba y agave pulquero. El piedemonte con pendiente media a accidentada (12 a 32%) contiene las unidades Regosol Háptico y Regosol Léptico, con calificador Éutrico. Sostienen bosque de pino. No presenta cultivos.

Suelos en ladera en toba riolítica y caliza con pendiente de 14 a 51%

Prevalecen las unidades Regosol Háptico, Phaeozem Háptico y Leptosol Rénzico, con calificador Éutrico. El Regosol sobre pendiente media (14-16%) sostiene cultivos de maíz, frijol y agave pulquero. En los grupos Phaeozem y Leptosol sobre laderas muy inclinadas (44 a 51%) domina el bosque de pino y encino, con escasa presencia de agave pulquero.

Suelos en superficie cumbre en toba riolítica con pendiente de 2 a 5%

Domina la unidad Phaeozem Háptico (Crómico), con cultivos de papa, haba y los frutales pera y durazno. No presenta agave pulquero.

Suelos en colada de basalto y cono de escoria con pendiente de 1 a 32%

La colada de lava con pendiente dominante de 1 a 5%, denota una secuencia de suelos de acuerdo al grado de intemperización de la roca, desde Regosol Háptico y Léptico sobre lava intemperizada a moderadamente intemperizada, hasta Leptosol Hiperesquelético en lava no intemperizada. Las tres unidades tienen calificador Éutrico. El Regosol Háptico, por su mayor profundidad, sostiene cultivos de maíz, frijol y agave pulquero. En el Leptosol domina la vegetación natural de nopal y palma izote, y gramíneas. El cono de escoria, con pendiente de 21 a 25%, contiene la unidad Regosol Léptico con vegetación natural de nopal y palma izote, y maguey disperso.

En este estudio se clasificaron y mapearon siete grupos de suelos, de los cuales Solonetz y Phaeozem no se habían reportado para la región (INEGI, 2023). Así mismo, no

hay concordancia en los polígonos de suelos y sus linderos a nivel de grupos y unidades obtenidas en este trabajo, en comparación con el mapa de suelos a nivel reconocimiento de INEGI (2023). Además, este estudio aporta información de 18 unidades de suelos, de las cuales destacan Arensol Prótico, Regosol Háptico y Regosol Léptico porque sostienen el cultivo de agave pulquero; estas unidades representan el 70.3% de la zona de estudio.

CONCLUSIONES

La clasificación y mapeo de geoformas y suelos a escala semidetallada en la región poblano-veracruzana, permitió definir cuatro unidades de suelo-geoforma-litología cultivadas con agave pulquero: 1) Regosol Háptico y Arensol Prótico en terraza sobre toba riolítica y pumicita con pendiente de 2 a 5%; 2) Regosol Háptico (Éutrico) y Regosol Léptico (Éutrico) en piedemonte en dacita, pumicita y caliza con pendiente de 2 a 10%; 3) Regosol Háptico en ladera en toba riolítica y caliza con pendiente de 14 a 16%; y 4) Regosol Háptico en colada de basalto intemperizado con pendiente de 1 a 5%.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Juarez B., Enríquez J. R., Rodríguez-Ortiz G., Granados D., Martínez B. (2014). El estado actual de *Agave salmiana* y *A. mapisaga* del valle de México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 1(2):106-120.
- Castro-Díaz A. S., Guerrero-Beltrán J. A. 2013. El agave y sus productos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 7(2):53-61.
- Castro-Díaz, A. S., & Guerrero-Beltrán, J. A. (2013). El agave y sus productos. *Temas selectos de Ingeniería de alimentos*, 7(2), 53-61.
- Colunga-García M. P., Zizumbo-Villarreal D. (2007). Tequila and other Agave spirits from west-central Mexico: current germplasm diversity, conservation and origin. *Plant Conservation and Biodiversity*, 79-93.
- García-Herrera E. J., Méndez-Gallegos S. J., Talavera-Magaña D. (2010). El género *Agave* spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecología. *Revista Salud Pública y Nutrición* 5:109-129.
- García-Mendoza, A. J. (2011). *Agavaceae*. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Instituto de Biología, UNAM. D.F. México. 88:1-95.
- García-Moya E, Romero-Manzanares A, Nobel PS. (2011). Highlights for Agave productivity. *GCB Bioenergy* 3: 4-14.
- INEGI. (2023). Edafología escala 1:250000. En: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- IUSS Working Group WRB. (2007). World Reference Base for Soil Resource 2006. World Soil Resources Reports No. 103, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 132 p.
- Lorenzo-Sacramento J. (2012). Éxito reproductivo y demografía de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry en San José Alchichica, Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana. Facultad de Biología. Xalapa-Enríquez, Ver.
- Mora-López JL, Reyes-Agüero JA, Flores-Flores JL, Peña-Valdivia, Aguirre-Rivera JR. (2011). Variación morfológica y humanización de la sección *Salminae* del género *Agave*. *Agrociencia* 45:465-477.
- Ortiz-Ceballos A. I. y Lara-González R. (2014). Diagnóstico del maguey pulquero en la región Poblano-Veracruzana. En: Informe Técnico Final del proyecto E2011-15-174696 Estrategias biotecnológicas de rescate, conservación y reactivación del cultivo del agave pulquero en la región Poblano-Veracruzana para

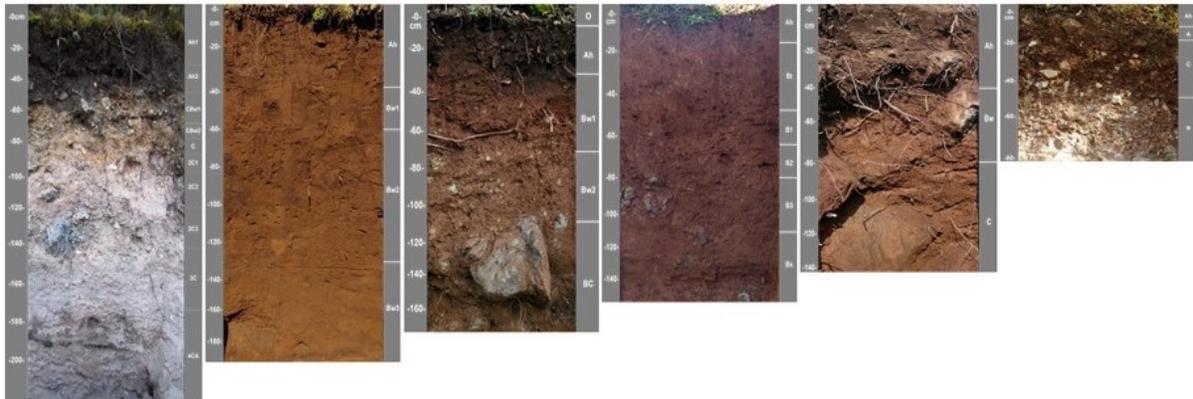
su uso integral en la producción industrial de biocombustibles y otros coproductos. Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT.

Reynoso-Santos, R., García-Mendoza, A. J., López-Báez, W., López-Luna, A., Iñíguez, P. C., Pérez-Farrera, M. A., & Gutiérrez, M. D. 2012. Identificación taxonomica de agaves (*Agave* spp.): utilizados para la elaboración del licor comiteco en Chiapas, México. *Agroproductividad*, 5(4), 9-18.

Secretaria 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.

Zinck, A.J., 2012. *Geopedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgo naturales*, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 123 p.

La agricultura será sustentable cuando diseñemos una para cada suelo



Fotografía de Ángeles Gallegos