



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

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

Alejandro Cueva¹; Susana Alvarado-Barrientos²; José Luis Andrade³; Fernando Arellano-Martín⁴; Fernando Ayala-Niño⁵; Stephen H. Bullock⁶; Mónica Cervantes-Jiménez⁷; 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 Tarín¹⁵; 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 - Subsede 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 (Rs), definida aquí como el flujo de dióxido de carbono (CO₂) 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 CO₂ debido a la productividad primaria bruta de la vegetación. La Rs 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 Rs 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 Rs 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 Rs, 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 Rs 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 %).

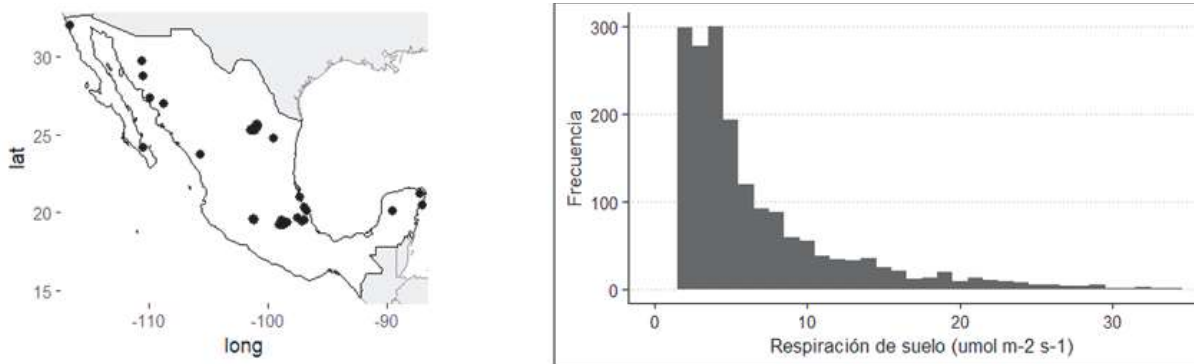


Figura 1. a) Mapa de México con la localización de los datos considerados en este trabajo. Los puntos negros indican los sitios de estudio. b) Distribución de los datos de respiración de suelo (Rs; N= 3294 observaciones).

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.

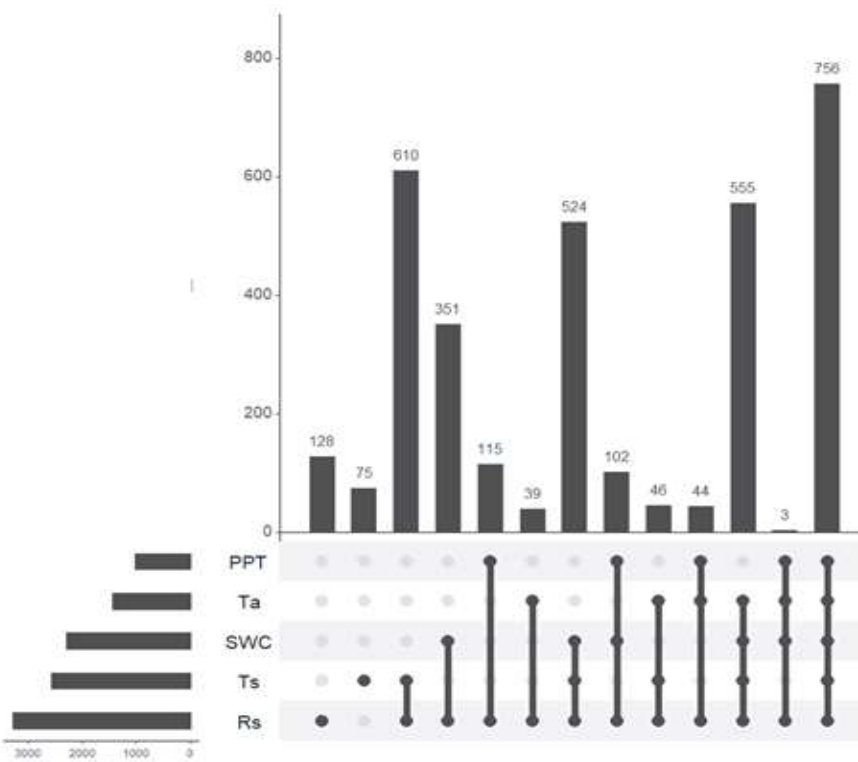


Figura 2. Gráfico UpSet para visualizar las intersecciones de la presencia/ausencia de observaciones en la base de datos, donde PPT es precipitación, Ta es temperatura del aire, SWC es contenido de humedad en el suelo, Ts es temperatura del suelo, y Rs es respiración del suelo.

Es importante contar con una base de datos consolidada y con la mayor cantidad de datos de R_s , 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 Q_{10} , que describe la sensibilidad de la R_s 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 $Q_{10} = 1.4$ (Hashimoto et al., 2015). Sin embargo, este valor de Q_{10} no toma en cuenta observaciones en sitios con temperaturas mayores a 30 °C, añadiendo incertidumbre a éste estimado global. Conocer el parámetro Q_{10} para ecosistemas mexicanos, y afinar el estimado global, mejoraría nuestro entendimiento sobre las posibles implicaciones del aumento de temperatura sobre las tasas de R_s , incluyendo el potencial de retroalimentar positivamente al aumento de la concentración de CO_2 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., Yepez, E.A., (2018). Base de datos sobre almacenes y flujos de carbono en los matorrales y pastizales xerófilos de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2, 200–209.
- Cueva, A., Robles Zazueta, C.A., Garatuza Payan, J., Yepez, 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.