



ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE CO₂ A PARTIR DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO

CO₂ MITIGATION STRATEGIES BASED ON SOIL RESPIRATION

Leticia Citlaly López-Teloxa^{1*}  y Alejandro Ismael Monterroso-Rivas² 

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma de Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, 56230, Estado de México, México.

² Departamento de Suelos, Universidad Autónoma de Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, 56230, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia: citlaly_lo@hotmail.com

Manuscrito recibido el 19 de marzo de 2020. Aceptado, tras revisión, el 16 de mayo de 2020. Publicado el 1 de septiembre de 2020.

Resumen

El suelo, además de almacenar es fuente de CO₂ a la atmósfera emitido por la respiración del suelo, principalmente por factores bióticos y abióticos, así como del manejo del suelo. El objetivo de la investigación fue evaluar la respiración del suelo en diferentes usos y cuantificar las emisiones de CO₂ en dos momentos diferentes del año, así como estimar el almacén de este para hacer un balance que permita establecer estrategias que ayuden con la mitigación del cambio climático. Mediante una cámara dinámica cerrada colocada en el suelo e integrada con un analizador de gas infrarrojo se midió la emisión de CO₂ cada 30 min, así como la temperatura y la humedad del suelo con sensores. Se analizaron tres usos del suelo (agroforestal, forestal y agrícola) y dos temporadas del año (verano e invierno) durante 24 horas continuas en cada sitio. Se encontró que existe correlación positiva entre la temperatura ambiental y la respiración del suelo. El sistema agrícola almacena bajo contenido de carbono en el suelo (50,31 t C ha⁻¹) y libera hasta 9,28 t de C ha⁻¹ en la temporada de mayor temperatura, en contraste con un sistema natural que emite 3,98 t de C ha⁻¹ y almacena 198,90 t de C ha⁻¹. El balance refleja la necesidad de conocer las emisiones de CO₂ a la atmósfera por los suelos y no sólo los almacenes. Contar con soporte científico desde la respiración del suelo a la atmósfera es un paso importante para la toma de decisiones que contribuyan a la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: Agrícola, almacén de C, cambio de uso de suelo, agroforestería, forestal.

Abstract

Soil, in addition to storing, provides CO₂ to the atmosphere emitted by soil respiration, mainly due to biotic and abiotic factors, as well as soil management. The objective of the research was to evaluate soil respiration in different uses and quantify its CO₂ emissions at two different times of the year, as well as estimate its storage to make a balance to

establish strategies that allow with the climate change mitigation. The CO₂ emission was measured every 30 min by using a closed dynamic chamber placed on the soil and integrated with an infrared gas analyzer, as well as temperature and moisture of the soil with sensors. Three land uses (agroforestry, forestry and agricultural) and two seasons of the year (summer and winter) were analyzed for 24 continuous hours at each site. Positive correlation between environmental temperature and soil respiration was found. The agricultural system stores low carbon content in the soil (50.31 t C ha⁻¹) and emits 9.28 t of C ha⁻¹ in the highest temperature season, in contrast to a natural system that emits 3.98 t of C ha⁻¹ and stores 198.90 t of C ha⁻¹. The balance sheet reflects the need to know CO₂ emissions to the atmosphere from soils and not just storages. Having scientific support from the ground to the atmosphere is an important step in decision-making that will contribute to climate change mitigation.

Keywords: Agricultural, C storage, land use change, agroforestry, forestry.

Forma sugerida de citar: López-Teloxa, L. y Monterroso-Rivas, A. (2020). Estrategias de mitigación de CO₂ a partir de la respiración del suelo. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 32(2):30-41. <http://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.03>.

IDs Orcid:

Leticia Citlaly López-Teloxa: <http://orcid.org/0000-0002-0258-325X>

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas: <http://orcid.org/0000-0003-4348-8918>

1 Introducción

El suelo puede actuar como fuente y sumidero de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico (Sainju, Jabro y Stevens, 2008). El constante aumento de CO_2 a la atmósfera es el principal factor del cambio climático, así como el incremento de las temperaturas y cambio de los patrones de precipitación (Liebermann y col., 2020). Una de las principales fuentes de emisiones de CO_2 es el suelo, también conocido como respiración del suelo (Rs), que además es uno de los componentes cruciales dentro del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres (Murcia-Rodríguez y Ochoa-Reyes, 2008). Es bien sabido que pequeños cambios en la Rs pueden influir en la concentración del carbono atmosférico y en el balance calórico (Kane y col., 2005; Murcia-Rodríguez y Ochoa-Reyes, 2008). Comprender bien la Rs es un paso importante, ya que contribuye a determinar si un ecosistema se comporta como fuente de carbono o sumidero de CO_2 (Burbano, 2018; Singh y col., 2015.). Desafortunadamente, el cambio de uso de suelo que se define como el cambio de cobertura del suelo a otro uso, y los cambios en las prácticas de manejo pueden tener relaciones importantes del balance de C, que es un importante precursor del incremento de la Rs (Francioni y col., 2019; Wang y col., 2013).

En México, (SEMARNAT-INECC, 2018), reportan durante el periodo de 1990 a 2015 el incremento de CO_2 que fue de 208%, mientras que, para el año 2015 la emisión neta ascendió a 503 473,80 Gg de CO_2 , de los cuales 11 340 Gg corresponden a la deforestación para nuevas tierras de cultivo. A pesar de que los procesos del suelo cumplen un papel fundamental en los flujos de carbono en los ecosistemas, aún hay poca información sobre la dinámica de la respiración del suelo. Es necesario entender los impactos de los cambios ambientales en los ecosistemas e identificar los factores que controlan las emisiones de CO_2 desde el suelo y sus efectos en las tasas de emisión (Ramírez y Moreno, 2008). La determinación de la Rs puede contribuir a desarrollar mejores herramientas de mitigación; además, provee información detallada para fomentar cobeneficios entre estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, teniendo como base el manejo y conservación del suelo (Serrano, Nuñez y Valleter, 2017).

Por ejemplo, Araújo de Santos y col. (2019) reportaron que un monocultivo de maíz emite 0,99 $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y maíz intercalado con frijol 1,00 $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Aunado a esto, la aplicación de diferentes tipos y concentraciones de fertilizante influyen en la Rs (Chi y col., 2020). El manejo del suelo influye en la Rs, ya que de acuerdo con Sándor y col. (2020), los métodos convencionales de arado favorecen en el incremento de la Rs. A su vez, Costa y col. (2018) evaluaron la respiración del suelo en un bosque preservado y SAF de cacao con y sin manejo, encontrando que el primero emite 45,03 $\text{mg } CO_2\text{-C } m^{-2} \text{ h}^{-1}$, mientras que SAF sin manejo emite hasta 125 $\text{mg } CO_2\text{-C } m^{-2} \text{ h}^{-1}$ y con manejo 41,8 $\text{mg } CO_2\text{-C } m^{-2} \text{ h}^{-1}$. Por otro lado, en un bosque de pino (*Pinus palustris* Mill.) se evaluó la Rs anual en rodales de diferentes edades entre 5 y 21 años, 12,0 $\text{Mg C } ha^{-1}$ y 13,9 $\text{Mg C } ha^{-1}$, respectivamente (ArchMiller y Samuelson, 2016). Así como también Tang y col. (2006) reportaron la Rs en diferentes bosques de hoja ancha, mixto y de pino, 450,5 \pm 22,3; 381,8 \pm 18,2 y 250,9 \pm 20,2 $\text{mg } CO_2\text{-C } m^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente, donde además reportan que se correlacionó con la temperatura y la humedad del suelo. Es decir que la Rs puede predecirse en combinación con la temperatura del suelo y el contenido de agua; y que según la ubicación del sitio de muestreo, los efectos de la Ts y Hs en la respiración del suelo variarán (Zhao y col., 2013).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la respiración del suelo en diferentes usos y cuantificar las emisiones de CO_2 en dos diferentes momentos del año, así como estimar el almacén de carbono para establecer balances que permitan formular estrategias que contribuyan a la mitigación del cambio climático.

2 Materiales y métodos

2.1 Descripción del sitio

2.1.1 Sistemas agroforestal y agrícola

Ambos sistemas cubren una superficie de 0,05 ha (10 \times 50 m) y se ubican entre las coordenadas 19°49'N y 98°89'O. Se ubican a 2250 msnm en un clima predominante templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual de 16,4°C y precipitación promedio anual de 618 mm. Los suelos son de tipo Vertisoles. Los sistemas forman

parte de una granja que integra diversas tecnologías que permiten la producción orgánica y agroecológica de hortalizas, frutales y carne, como pescado, conejo y borrego desde hace aproximadamente 20 años.

El sistema agroforestal (SAF) consiste en tecnología de cultivo en callejones con árboles frutales de *Prunus persica* (durazno), *Pyrus communis* (peras) y *Malus domestica* (manzanas) en el porte arbóreo. La separación entre árbol y árbol es de 2.5 m. Anualmente se siembran hortalizas intercaladas (*Beta vulgaris* sp. (acelga), *Lactuca sativa* (lechuga) y *Cucurbita pepo* (calabaza), *Ruta graveolens* (ruda) y *Avena sativa* (para pastoreo). Por otra parte, el sistema agrícola de monocultivo (SAM) consiste en maíz (*Zea mays*) sembrado en surcos y con sistema de riego. Para el inicio del ciclo de cultivo el suelo es labrado y periódicamente se deshierba de manera manual.

2.1.2 Sistema forestal templado

El sistema forestal templado (SFT) cubre una superficie de 1640,48 ha, se ubica entre las coordenadas 19° 15' N y 98° 37' O (Chávez-Salcedo y col., 2018). Los climas dominantes son en las partes de mayor altitud semifríos y circunscribiendo a éstos el clima es templado, la precipitación media anual va desde 800 mm hasta 1200 mm, la temperatura media anual va desde los 6°C en las zonas de mayor altitud hasta los 14°C (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez y Maga, 2005). La vegetación se caracteriza por bosques templados, siendo el bosque de pino el de mayor extensión (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez y Maga, 2005).

2.2 Respiración del suelo

La Rs se midió con un equipo portátil 8100A LICOR y dos cámaras, una fija y una de tomas rápidas (LICOR Biosciences, 2015). Las cámaras son cerradas de 20 cm de diámetro que se colocan sobre collares de PVC insertados en el suelo con al menos 24 horas de anticipación y a 3 cm de profundidad («Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (respiración) en suelos durante intervalos horarios diurnos.»). El diseño experimental consistió en instalar dos cámaras separadas a 5 m entre sí para lograr dos observaciones simultáneas cada media hora. El equipo 8100A LICOR monitorea los cambios en la concentración de CO₂ a lo largo del

tiempo dentro de la cámara a través de espectroscopía de absorción óptica en la región infrarroja (analyzer de gas infrarrojo IRGA). La cámara mide durante 90 segundos la concentración de CO₂, de los cuales los primeros 30 segundos son de banda muerta para estabilizar y no son considerados.

El CO₂ atmosférico acumulado en la cámara se mide como flujo de CO₂ en micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de aire seco, que posteriormente son convertidos a gramos por hora ($\text{g CO}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$). El flujo de CO₂ reportado es el resultado de la emisión del suelo por respiración autotrófica (raíces de plantas) y heterotrófica (microorganismos) (Moitinho y col., 2015). La cámara cuenta con sensores (modelo p/n8150-203 Soil Temperature Probe y 8100-204 Theta Soil Moisture Probe suelo) que permiten además registrar temperatura y humedad del suelo (Ts y Hs, respectivamente).

2.3 Carbono orgánico almacenado

Para determinar el carbono orgánico del suelo (COS) se analizaron un total de 9 muestras de suelo para cada uno de los 3 sitios, teniendo un total de 27 por temporada. Cada muestra se recolectó por el método de muestras inalteradas a tres profundidades, 0-10, 10-20 y 20-30 cm con una barrena compuesta por dos anillos de radio 2,6 cm y una altura de 2,9 cm, por lo que el volumen de suelo calculado por cada anillo es de 63,98 cm³ (Etchevers Barra y col., 2005). Las muestras recogidas se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron con un tamiz de 100 mm. Para obtener la DAP se pesó la muestra de suelo completa (seca) y se separaron y pesaron piedras y raíces. El porcentaje de carbono orgánico fue determinado con un analizador de carbono orgánico total (TOC-V, Shimadzu Labs) equipado con un módulo de muestras sólidas (modelo SSM-5000, Shimadzu Labs).

2.4 Diseño experimental

La Rs se determinó en tres usos del suelo (SFT, SAF y SAM) en dos temporadas del año, verano e invierno. La Rs se determinó durante 24 horas en cada sitio, teniendo así 3 sitios, 144 h y 576 mediciones por temporada. Registros meteorológicos diarios [temperatura ambiental (Tamb) y precipitación (Prec)] se obtuvieron con una estación meteorológica portátil (La Crosse Technology Mod. C86234)

colocada a 1,5 m de altura y a 1 m de distancia de la cámara de medición y toma de muestras. Además, los datos se corroboraron con estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de muestreo: Estación Chapingo y Estación Ávila Camacho operada por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) y Estación Alzomoni operada por Sistema Monitoreo Nacional (<https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas-3>), del Edo. de México.

2.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico fue para 2 momentos: 1) El análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de Tukey se utilizaron para identificar diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los valores de respiración, temperatura y humedad del suelo entre las dos temporadas y los tres usos del suelo. Para obtener mayor veracidad y reducir los posibles errores los datos primero se estandarizaron. 2) Se utilizó el análisis de correlación Pearson para identificar la correlación entre la respiración del suelo de los tres usos del suelo y las variables climáticas (T_s , H_s , T_{amb} y $Prec$).

3 Resultados

3.1 Descripción del sitio

La R_s en los tres usos del suelo y ambas temporadas se presentan en la figura 1. La R_s en el SFT fluctúa de 0,20 a 0,40 $g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$, en el SAF de 0,41 a 0,61 $g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$ y SAM de 0,67 a 0,99 $g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$ en la temporada de verano. Se observan incrementos a las 08:00 horas, alcanzando máximos entre las 13:00 y 15:00 horas. La R_s en el SAM es un 35% mayor comparada con el SAF. La R_s en un sistema natural como el SFT es 50% menor comparada con un manejo agrícola, ya que esto se debe, principalmente, a la mineralización del carbono orgánico en el suelo que aumenta su tasa de descomposición por la labranza y la estructura del suelo se altera, incrementando la difusividad del CO_2 como lo reporta Baah-Acheamfour y col. (2016).

Por otro lado, durante la temporada de invierno, el SFT fluctúa de 0,15 a 0,24 $g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$, en el SAF fluctúa de 0,19 a 0,62 $g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$ y en el SAM 0,23 a 0,60 $g\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}$. La R_s en sistemas naturales

se debe principalmente a la acción conjunta de factores bióticos y abióticos como son: tipo y edad de la vegetación, tipo de suelo y variaciones climáticas (Hu y col., 2018).

En lo que se refiere a temperatura y humedad, Oertel y col. (2016) mencionan que varían significativamente con la profundidad y las características del sitio, por ejemplo, la exposición a la luz, la sombra y el viento. Durante la temporada de verano, en los SAF y SAM la temperatura ambiental presentó variación de 13,5 a 23,9°C y cero milímetros de lluvia reportados. Mientras que en el bosque la variación fue de 6,9 a 13,3°C y 2,6 mm de lluvia a lo largo del día. Los SAF y SAM presentan valores y comportamientos similares en T_s a lo largo de la temporada de 15,7 a 24,8°C y 15,3 a 23,5°C, respectivamente, con máximos entre las 12:00 y 14:00 horas, que es cuando la respiración presenta sus puntos máximos. Por otro lado, en el SFT la T_s varió de 8,12 a 11,97°C. En los que respecta a la H_s , en el SAF varió de 0,16 a 0,20 $m^3\ m^{-3}$, mientras que la humedad en los SAM y SFT son similares, 0,36 a 0,40 $m^3\ m^{-3}$ y 0,37 a 0,53 $m^3\ m^{-3}$, respectivamente. En el SAM el incremento de H_s se debe principalmente a que el sistema es de riego, el cual se lleva a cabo todos los días en un horario de 10:00 a 12:00 horas.

Durante la temporada de invierno, como es de esperarse, los valores de temperatura ambiental son menores en los SAF y SAM, la temperatura ambiental varió de 3,4 a 23,9°C y cero milímetros de lluvia. Mientras que en el SFT la temperatura osciló de 2,2 a 13,3°C y 1 mm de lluvia a lo largo del día. Los SAF y SAM presentan valores y comportamientos similares en la T_s a lo largo de día de 3,1 a 20,3°C y 2,6 a 20,6°C, respectivamente, con máximos entre las 13:00 y 14:00 horas. A diferencia de la primera temporada, el SAF y SFT los registros de humedad son similares 0,25 a 0,27 $m^3\ m^{-3}$ y 0,22 a 0,23 $m^3\ m^{-3}$, respectivamente. Debido a un periodo de barbecho en el SAM la H_s presentó los valores más bajos registrados de 0,15 a 0,16 $m^3\ m^{-3}$, aunado al hecho de la falta de precipitación durante el periodo evaluado. En cultivos agrícolas, la R_s se correlaciona con características físicas del suelo, la temperatura y humedad del suelo (Araújo de Santos y col., 2019).

La respiración del suelo presentó mayores emisiones en los periodos de mayor temperatura, por lo que se puede asegurar que está mayormente co-

rrelacionada con ésta (figura 1). Por otro lado, a causa del riego en un suelo seco se incrementa la Rs al aumentar las actividades microbianas (Sainju, Jabro y Stevens, 2008). En cuanto al COS, se encontraron concentraciones de 198,9; 89,97 y 58,55 t ha⁻¹ para SFT, SAF y SAM, respectivamente, para la temporada de verano, mientras que para la siguiente temporada los dos casos primeros disminuyeron su

concentración a 171,36 y 76,50 t ha⁻¹, mientras que SAM aumentó a 65 t ha⁻¹. Sin embargo, de manera general se presenta el siguiente orden de concentración tanto para el verano como para el invierno SAM > SAF > SFT, similar a lo reportado por López-Teloxa y col. (2017), quienes aseguran que el uso y manejo del suelo influye considerablemente en el contenido de COS.

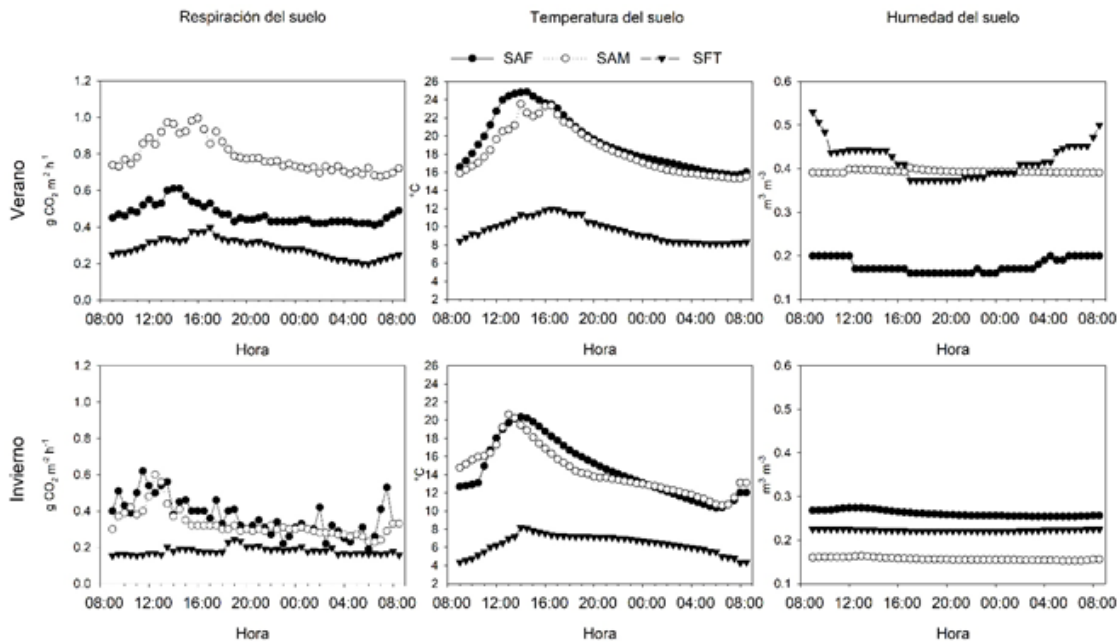


Figura 1. Variación de Rs, Ts y Hs a lo largo del día en Verano e Invierno.

3.2 Análisis estadístico

La Tabla 1 resume los valores promedio de Rs, COS, Ts y Hs por estación de muestreo (verano e invierno) y usos del suelo (SFT, SAF y SAM). Los ANDEVA se realizaron siguiendo los tres factores del protocolo de muestreo para determinar la variabilidad de los parámetros del suelo entre los factores (temporada, uso de la tierra y hora de muestreo) del sitio considerado (Tabla 2). En los valores de Rs y Ts se observan diferencias significativas en temporada, uso de la tierra y hora de muestreo, así como entre sus interacciones. Es decir, la variación de la temperatura ambiental en cada temporada y el transcurso del día, así como la perturbación del suelo debido a los diferentes usos influyen considerablemente en la Rs y Ts (Baah-Acheamfour y col., 2016; Murcia-Rodríguez y Ochoa-Reyes, 2008). Au-

nado a lo anterior, las prácticas de gestión afectan considerablemente la Rs (Sainju y col., 2014). A pesar del hecho de que las condiciones ambientales como la temperatura y la precipitación normalmente tienen una influencia dominante en la cantidad de COS en el suelo (López-Teloxa y col., 2017), no se observaron diferencias estadísticas según las temporadas de muestreo ($p=0.40$), pero sí se observan de acuerdo a los usos ($p<0,05$). Las temporadas de muestreo, usos del suelo, hora de medición y la interacción temporada con uso del suelo influyen en la variación de la Hs ($p<0,05$).

Diversos estudios han demostrado que existe correlación con la Rs y variables ambientales así como con su efecto combinado (Figura 2) (Murcia-Rodríguez, Ochoa-Reyes y Poveda-Gómez, 2012;

Ramírez y Moreno, 2008). Como es el caso SAF y SAM, en donde la T_s y T_{amb} presentan alta correlación positiva en la R_s ($p < 0,05$), pero presenta evidencia no concluyente sobre la significancia en SFT ($p > 0,05$). Además de las bajas temperaturas en el SFT, el sistema se encuentra conservado y con poca o nula perturbación del suelo a diferencia del SAF y SAM. Por otro lado, la H_s presenta correlación positiva en SAM y SFT, esto concuerda con otros estudios, donde se reportó que los valores de la R_s aumenta después de eventos de precipitación o riego (La Scala y col., 2001; Moitinho y col., 2015; Pannoso y col., 2009), mientras que para SAF es negativa para los tres casos $p < 0,05$. La relación entre temperatura y contenido de humedad con la R_s resulta en interacciones complejas que dependen de la limitación relativa de estas dos variables sobre la actividad microbiana y de raíces, así como sobre la difusión de gases (Ramírez y Moreno, 2008). Dado

que no se reportaron datos de precipitación durante los muestreos en SAF y SAM para ambas temporadas, la correlación de Pearson es nula. Mientras que en el SFT la correlación es positiva con la precipitación ($p < 0,05$). El COS influye de manera negativa, es decir, que disminuye al incrementar la R_s , esto ocurre para los SAF y SFT, mientras que es positiva para SAM, este último podría deberse al ingreso de fertilizantes o al manejo del sitio (Sainju, Jabro y Stevens, 2008). En resumen, la R_s esta mayormente influenciada por variables climáticas tanto del ambiente como del suelo, siendo la temperatura del suelo de mayor influencia (Mukumbuta, Shimizu y Hatano, 2019), lo que concuerda con lo mencionado por ArchMiller y Samuelson (2016) y Han, Shi y Jin (2018) y Wang y col. (2013), la R_s incrementa exponencialmente con el aumento de la T_s .

Tabla 1. Respiración y almacenes de CO_2 por uso de suelo y temporada del año.

USO DEL SUELO	TEMPORADA	R_s $g\ m^{-2}\ h^{-1}$	COS $t\ ha^{-1}$	T_s $^{\circ}C$	H_s $m^3\ m^{-3}$
SFT	Verano	0,29±0,05a	198,9±31,4a	9,65±1,30a	0,42±0,04a
	Invierno	0,18±0,02b	171,36±19,7a	6,36±1,04b	0,22±0,00b
SAF	Verano	0,47±0,05a	86,97±7,96a	19,32±3,05a	0,18±0,01a
	Invierno	0,38±0,11b	76,5±7,78a	14,60±3,14b	0,26±0,007b
SAM	Verano	0,79±0,09a	58,55±11,65a	18,34±2,61a	0,39±0,002a
	Invierno	0,32±0,07b	65,00±14,1a	14,40±2,64b	0,16±0,003b

Letras a y b indican diferencias significativas (prueba de Tukey).

SFT= Sistema forestal templado, SAF= Sistema agroforestal, SAM= Sistema agrícola de monocultivo.

4 Discusión

Como se esperaba en un bosque, se observaron menores emisiones comparadas con un sistema agrícola de hasta un 50% menos. Datos similares a lo encontrado por Campos (2014), reportan que en un bosque nuboso se emiten hasta $89,6\ mg\ C\ m^2\ h^{-1}$ mientras que en un sistema agrícola con rotación de maíz-papa-maíz emiten $128,1\ mg\ C\ m^2\ h^{-1}$. Respecto a las diferencias entre verano e invierno encontramos un comportamiento similar, aunque el SAM reduce su emisión a nivel semejante al SAF, pero conserva la tendencia de ser más emisor. Ya que los sistemas alterados presentan mayor emisión de CO_2 especialmente en los meses de verano (Abdalla y col., 2018). Los resultados de la presente

investigación resaltan la importancia del análisis de la respiración del suelo en diferentes usos, con la finalidad de ofrecer sistemas multifuncionales que garanticen la seguridad alimentaria y diversidad de beneficios ambientales.

Las prácticas de uso y manejo del suelo pueden afectar la emisión de CO_2 a la atmósfera al modificar la temperatura y el contenido de agua del suelo (Baah-Acheamfour y col., 2016). Una práctica comúnmente utilizada en sistemas agrícolas es la labranza, la cual puede secar el suelo y, por lo tanto, incrementar la temperatura debido a la perturbación del suelo y disminución de residuos en la superficie de este. Lo que concuerda con lo encontrado por Nouchi y Yonemura (2005), en donde en

Tabla 2. Valores p resultantes del análisis de varianza multivariante a un nivel de confianza del 95%.

Factor	Variable			
	Rs	COS	Ts	Hs
Temporada	0,00	0,40	0,00	0,00
Uso de suelo	0,00	0,00	0,00	0,00
Hora de medición	0,00	N.D.	0,00	0,04
Temporada * Uso de suelo	0,00	0,49	0,00	0,00
Temporada * Hora de medición	0,00	N.D.	0,00	1,00
Uso de suelo * Hora de medición	0,01	N.D.	0,00	0,92

un arrozal con labranza la emisión anual es de 2845 g CO₂ m⁻² por año mientras que sin labranza es de 2198 g CO₂ m⁻² por año.

Los resultados aquí obtenidos muestran que existe correlación positiva entre la temperatura ambiental y emisiones de CO₂ o Rs, lo que concuerda con lo mencionado por Wang y col. (2013), quienes

aseguran que la Rs es menor a temperaturas bajas. Por otro lado, el riego en suelos que han permanecido durante largo periodo de tiempo expuestos directamente a los rayos del sol incrementa la Rs, esto se debe a la respiración microbiana que se encuentra limitada por el estrés hídrico (Curtin y col., 2000).

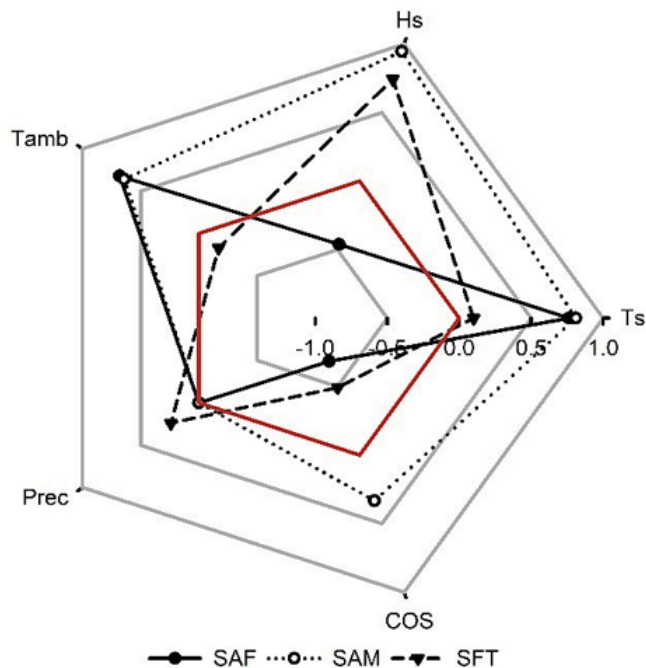


Figura 2. Correlación con variables ambientales y COS de acuerdo con la Rs. Nota: Variables cercanas a la línea roja no presentan correlación.

El sistema y tipo de cultivo, como es el caso del SAF y SAM, presentan diferencias en cuanto a la Rs, Ts y Hs, ya que existe mayor cobertura del suelo en un SAF que en un monocultivo, además de los periodos en barbecho que afectan la intensidad de la sombra y la evapotranspiración (Sainju, Jabro y Stevens, 2008). Las prácticas de manejo, como la labranza, pueden aumentar la emisión de CO_2 del suelo al alterar los agregados del suelo, reducir residuos de vegetales y oxidar el C orgánico del suelo más del 47% en 5 años, mientras que las prácticas de labranza cero puede reducir la intensidad del cultivo y aumentar el COS (Patiño-Zúñiga y col., 2009). Esta es una limitante de nuestros resultados pero que enmarcan el trabajo de investigación futura para afinar los estudios de respiración en diferentes usos y manejos del suelo.

En lo que se refiere a los almacenes de carbono el comportamiento es como se esperaba, el SFT conserva más que el SAM, mientras que por temporadas no se observan diferencias. Similar a lo encontrado por López-Teloxa y col. (2017) donde la concentración de COS es mayor en un bosque con vegetación secundaria en contraste con agricultura de temporal, 28,44 y 20,42 $t\ ha^{-1}$, respectivamente. Una vez que se cuantificó la emisión y el almacenamiento de C se planteó un balance (Tabla 3). Como lo encontrado por Mukumbuta, Shimizu y Hatano (2019) en un pastizal, reportando un balance de 1,2 $t\ C\ ha^{-1}$ (COS de 8 $t\ C\ ha^{-1}$ y Rs de 6,8 $t\ C\ ha^{-1}$).

Un factor importante que ayuda a comprender el balance integral de C de un agroecosistema es la estrecha relación entre la Rs y COS (Alberti y col.,

2010). Es claro que un sistema agrícola conserva menores cantidades de carbono en el suelo, liberando hasta 9,28 t de $C\ ha^{-1}$ en la temporada de mayor temperatura, en contraste con un sistema natural (3,98 t de $C\ ha^{-1}$), por lo que los sistemas agroforestales son un punto intermedio que permiten asegurar la alimentación, pero a la vez conservar en lo más posible el suelo (Tabla 3), que de acuerdo a diversos autores como Baah-Acheamfour y col. (2016) y Kwak y col. (2019) es una práctica de uso del suelo que además de introducir árboles y arbustos a las tierras de cultivo o al ganado, ayuda a mitigar potencialmente las emisiones de CO_2 de los sistemas agrícolas.

Por último, los resultados de esta investigación abonan a los estudios de cambio climático sobre los suelos. Cabe recordar que según el IPCC (2013), el aumento de la temperatura es inequívoco y se espera de manera global un incremento de la temperatura en todo el planeta (UNFCCC, 2015). Frente a este panorama, el suelo puede contribuir a la mitigación del cambio climático en la medida en que se sistematice el uso del suelo y se conserve el carbono orgánico del mismo (Burbano, 2018) adecuando las prácticas de manejo y riego en diferentes temporadas del año (Francioni y col., 2019; Chi y col., 2020). Las acciones realizadas y adaptadas a cada sistema ofrecen soluciones beneficiosas para enfrentar múltiples desafíos ambientales y sociales (Tschora y Cherubini, 2020). Así, los siguientes estudios deberán enfocarse en las diferentes prácticas de manejo del suelo, temporadas del año y ciclos de cultivo, con la finalidad de comprender con mayor detalle el balance de la Rs y COS.

Tabla 3. Balance del carbono emitido y almacenado del suelo.

USO DEL SUELO	TEMPORADA	C emitido $t\ ha^{-1}$	C almacenado $t\ ha^{-1}$			
			Profundidad (cm)			Total
			0 - 10	10 - 20	20 -30	
SFT	Verano	3,98	77,21	64,54	57,14	198,90
	Invierno	1,91	66,59	58,30	46,46	171,36
SAF	Verano	5,55	29,24	28,74	23,36	81,34
	Invierno	4,36	25,88	24,41	20,85	71,14
SAM	Verano	9,28	14,94	14,99	20,39	50,31
	Invierno	3,86	21,42	21,32	24,04	66,78

SFT= Sistema forestal templado, SAF= Sistema agroforestal, SAM= Sistema agrícola de monocultivo.

5 Conclusiones

Estudiar la dinámica almacén- emisión de carbono en los ecosistemas terrestres sustenta la comprensión del problema y ayuda en la definición de mejores políticas y programas de atención. El cambio de uso de suelo que incrementa las pérdidas de carbono orgánico del suelo principalmente en forma de CO₂ debe evitarse a la vez que se fomentan coberturas naturales o sistemas de producción agroforestales.

El incremento en la temperatura global ha impactado en el ciclo del carbono, principalmente en su parte edáfica, lo cual se agrava por la deforestación y apertura a nuevas áreas agrícolas. Se considera importante mejorar el conocimiento de diversos sistemas de producción multifuncionales que contribuyan a la disminución de las emisiones de CO₂ e incremento de carbono almacenado en el suelo.

Este estudio permitió evaluar los usos del suelo que más contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático con la incorporación de sistemas agroforestales al sistema de producción. Además, la importancia que tiene la cobertura del suelo durante todo el año, ya que los periodos de barbecho pueden ser perjudiciales tanto para el suelo como para la contribución del CO₂ a la atmosfera. Cabe resaltar que los datos obtenidos son los primeros reportados en los sitios evaluados, por lo que es importante continuar las mediciones a lo largo de todo el año para caracterizar el comportamiento en la Rs en los sistemas agroforestales. Contar con soporte científico desde la Rs (emisión del CO₂) a la atmosfera es un paso importante para la toma de decisiones que contribuirá a la mitigación del cambio climático.

Referencias

- Abdalla, K. y col. (2018). «Grassland degradation significantly enhances soil CO₂ emission». En: *Catena* 167, 284-292. Online:https://bit.ly/3kZk6co.
- Alberti, G. y col. (2010). «Changes in CO₂ emissions after crop conversion from continuous maize to alfalfa». En: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 136.1-2, 139-147. Online:https://bit.ly/3aFbSkZ.
- Araújo de Santos, G. y col. (2019). «Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission». En: *Science of the total environment* 686, 413-424. Online:https://bit.ly/2DZQR8U.
- ArchMiller, A. A. y L. J. Samuelson (2016). «Intra-annual variation of soil respiration across four heterogeneous longleaf pine forests in the southeastern United States». En: *Forest ecology and management* 359, 370-380. Online:https://bit.ly/34dI4uA.
- Baah-Acheamfour, M. y col. (2016). «Forest and grassland cover types reduce net greenhouse gas emissions from agricultural soils». En: *Science of the total Environment* 571, 1115-1127. Online:https://bit.ly/2Q9KYbr.
- Burbano, H. (2018). «El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático». En: *Revista de Ciencias Agrícolas* 35.1, 82-96. Online:https://bit.ly/2QaRNte.
- Campos, A. (2014). «Trends in soil respiration on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico): Environmental contributions». En: *Catena* 114, 59-66. Online:https://bit.ly/2Q6e7UY.
- Chávez-Salcedo, L. F. y col. (2018). «Contrasting arthropod communities associated with dwarf mistletoes *Arceuthobium globosum* and *A. vaginatum* and their host *Pinus hartwegii*». En: *Journal of Forestry Research* 29.5, 1351-1364. Online:https://bit.ly/3hexeIt.
- Chi, Y. y col. (2020). «Effects of fertilizer types and water quality on carbon dioxide emissions from soil in wheat-maize rotations». En: *Science of The Total Environment* 698, 134010. Online:https://bit.ly/3aDtuxG.
- Costa, E. N. D. y col. (2018). «Soil organic matter and CO₂ fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry». En: *PloS one* 13.7, e0200550. Online:https://bit.ly/3g7JbhK.
- Curtin, D. y col. (2000). «Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations». En: *Soil Science Society of America Journal* 64.6, 2080-2086. Online:https://bit.ly/3j0SJNt.
- Etchevers Barra, J. y col. (2005). *Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas*.
- Francioni, M. y col. (2019). «Seasonal Soil Respiration Dynamics and Carbon-Stock Variations in Mountain Permanent Grasslands Compared to

- Arable Lands». En: *Agriculture* 9.8, 165. Online: <https://bit.ly/3l3lWZZ>.
- Han, M., B. Shi y G. Jin (2018). «Conversion of primary mixed forest into secondary broadleaved forest and coniferous plantations: Effects on temporal dynamics of soil CO₂ efflux». En: *Catena* 162, 157-165. Online: <https://bit.ly/3aEUBbu>.
- Hu, S. y col. (2018). «Soil autotrophic and heterotrophic respiration respond differently to land use change and variations in environmental factors». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 250, 290-298. Online: <https://bit.ly/2EfVHyq>.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. por T.F. Stocker y col. 1535 pp. Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kane, E. S. y col. (2005). «Soil carbon stabilization along climate and stand productivity gradients in black spruce forests of interior Alaska». En: *Canadian Journal of Forest Research* 35.9, 2118-2129. Online: <https://bit.ly/325LJrC>.
- Kwak, J. H. y col. (2019). «Introducing trees to agricultural lands increases greenhouse gas emission during spring thaw in Canadian agroforestry systems». En: *Science of the Total Environment* 652, 800-809. Online: <https://bit.ly/3h8WcJb>.
- La Scala, N. y col. (2001). «Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brazil». En: *Soil and Tillage Research* 62.3-4, 163-166. Online: <https://bit.ly/34kzDxx>.
- Liebermann, R. y col. (2020). «Simulating Long-Term Development of Greenhouse Gas Emissions, Plant Biomass, and Soil Moisture of a Temperate Grassland Ecosystem under Elevated Atmospheric CO₂». En: *Agronomy* 10.1, 50. Online: <https://bit.ly/2YhwCdr>.
- Lomas-Barrié, C. T., S. Terrazas-Domínguez y H. Maga (2005). «Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el parque nacional Zoquiapan y anexas». En: *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11.1, 57-71. Online: <https://bit.ly/31aHbRE>.
- López-Teloxa, L. C. y col. (2017). «Short-temporal variation of soil organic carbon in different land use systems in the Ramsar site 2027 'Presa Manuel Ávila Camacho' Puebla». En: *Journal of Earth System Science* 126.7, 95. Online: <https://bit.ly/3g9vajr>.
- López-Teloxa, L., A.I. Monterroso-Rivas y J.D. Gómez-Díaz. «Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (respiración) en suelos durante intervalos horarios diurnos.» *Agrociencia*, p. En prensa.
- Moitinho, M. y col. (2015). «On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production». En: *Soil and Tillage Research* 148, 127-132. Online: <https://bit.ly/32cv0TL>.
- Mukumbuta, I., M. Shimizu y R. Hatano (2019). «Short-term land-use change from grassland to cornfield increases soil organic carbon and reduces total soil respiration». En: *Soil and Tillage Research* 186, 1-10. Online: <https://bit.ly/2YkdICK>.
- Murcia-Rodríguez, M. A. y M. P. Ochoa-Reyes (2008). «Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del Bosque Altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia». En: *Caldasia* 30.2, 337-353. Online: <https://bit.ly/2YjaCiy>.
- Murcia-Rodríguez, M., M. P. Ochoa-Reyes y F. Poveda-Gómez (2012). «Respiración del suelo y caída de hojarasca en el matorral del bosque altoandino (Cuenca del Río Pamplonita, Colombia)». En: *Caldasia*, 165-185. Online: <https://bit.ly/2EhIHiz>.
- Nouchi, I. y S. Yonemura (2005). «CO₂, CH₄ and N₂O Fluxes from Soybean and Barley Double-Cropping in Relation to Tillage in Japan». En: *Phyton - Annales Rei Botanicae* 45.4, 327. Online: <https://bit.ly/325LHAc>.
- Oertel, C. y col. (2016). «Greenhouse gas emissions from soils—A review». En: *Geochemistry* 76.3, 327-352. Online: <https://bit.ly/3ghU1lg>.
- Panosso, A. R. y col. (2009). «Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements». En: *Soil and Tillage Research* 105.2, 275-282. Online: <https://bit.ly/3l5wHem>.
- Patiño-Zúñiga, L. y col. (2009). «The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N₂O, CO₂ and CH₄ in the central highlands of Mexico: a laboratory study». En: *Plant and Soil* 314.1-2, 231-241. Online: <https://bit.ly/34mBrGx>.
- Ramírez, Á. y F. Moreno (2008). «Respiración microbiana y de raíces en suelos de bosques tropicales».

- les primarios y secundarios (Porce, Colombia).» En: *Revista facultad nacional de agronomía Medellín* 61.1, 4381-4393. Online: <https://bit.ly/3iUf6ny>.
- SEMARNAT-INECC (2018). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático*. Inf. téc. Online: <https://bit.ly/31cO1Ge>. SEMARNAT.
- Sainju, U. M., J. D. Jabro y W. B. Stevens (2008). «Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by irrigation, tillage, cropping system, and nitrogen fertilization». En: *Journal of Environmental Quality* 37.1, 98-106. Online: <https://bit.ly/326JtjX>.
- Sainju, Up. M. y col. (2014). «Net global warming potential and greenhouse gas intensity influenced by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization». En: *Journal of Environmental Quality* 43.3, 777-788. Online: <https://bit.ly/2CMYIL4>.
- Sándor, Z. y col. (2020). «Effect of various soil cultivation methods on some microbial soil properties». En: *DRC Sustainable Future* 1.1, 14-20. Online: <https://bit.ly/2QbylwI>.
- Serrano, E., M. Nuñez y E. Valleter (2017). «Respiración de dióxido de carbono de suelo, en bosque tropical húmedo–Gamboa Panamá». En: *I+D Tecnológico* 13.2, 49-54. Online: <https://bit.ly/2FziplG>.
- Singh, S. K. y col. (2015.). «Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems». En: *Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants* 6, 99–131. Online: <https://bit.ly/3j1DN1h>.
- Tang, X. y col. (2006). «Dependence of soil respiration on soil temperature and soil moisture in successional forests in southern China». En: *Journal of Integrative Plant Biology* 48.6, 654-663. Online: <https://bit.ly/31efc3o>.
- Tschora, H. y F. Cherubini (2020). «Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa». En: *Global Ecology and Conservation* 22, e00919. Online: <https://bit.ly/3hrqPdb>.
- UNFCCC, ed. (2015). *Decision 1/CP.21. The Paris Agreement*. Online: <https://bit.ly/2YntEV3>.
- Wang, C. y col. (2013). «Seasonality of soil CO₂ efflux in a temperate forest: Biophysical effects of snowpack and spring freeze–thaw cycles». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 177, 83-92. Online: <https://bit.ly/3g8wV0o>.
- Zhao, Z. y col. (2013). «Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and moisture in an oasis cotton field, central Asia». En: *Agriculture, ecosystems and environment* 168, 46-52. Online: <https://bit.ly/2Qbybp6>.