



RESPIRACIÓN DEL SUELO EN UN SISTEMA AGROSILVOPASTORIL EN EL CENTRO DE MÉXICO †

[SOIL RESPIRATION IN AN AGROSILVOPASTORAL SYSTEM IN CENTRAL MEXICO]

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

¹Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México C.P. 56230. Email. citlaly_lo@hotmail.com

²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México C.P. 56230. Email. aimrivas@correo.chapingo.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The CO₂ emission flow from the soil, known as soil respiration, is an important pathway in the global carbon cycle. **Objective.** Thus, the objective of the present was to determine the variation of CO₂ emissions according to a) different management before, during and after grazing by cattle; b) influence of environmental and soil factors on emissions, as well as c) adjust a model and assess its sensitivity to dimension the applicability in soil respiration behavior. **Methodology.** The soil respiration was measured every 30 min for 312 hours followed by a closed dynamic chamber of known volume placed on the floor, integrated with an infrared gas analyzer (Model 8100-104). **Results.** The results indicate that the total emissions in each management were 228, 128 and 241 kg CO₂ ha⁻¹ day⁻¹ in an agroforestry system with fruit trees before, during and after grazing, respectively. The ambient temperature influences the respiration of the soil in the three ways. While soil moisture affects only during and after grazing. **Implications.** Since the results are limited, it is important to evaluate and analyze for long periods of time to understand the behavior of the R in agroforestry systems. **Conclusion.** In the sensitivity analysis, the increase of 2 °C and 20% in variables such as precipitation, soil temperature and soil moisture would favor the increase of the CO₂ flow from the soil to the atmosphere.

Keywords: climate change; soil temperature; soil moisture; environmental variables.

RESUMEN

Antecedentes. El flujo de emisión de CO₂ del suelo, conocido como respiración del suelo, es una vía importante del ciclo global del carbono. **Objetivo.** Así, el objetivo del presente fue determinar la variación de las emisiones de CO₂ de acuerdo con a) diferentes manejos antes, durante y después de pastoreo por ganado; b) influencia de factores ambientales y del suelo en las emisiones, así como c) ajustar un modelo y evaluar su sensibilidad para dimensionar la aplicabilidad en el comportamiento de la respiración del suelo. **Metodología.** La respiración del suelo se midió cada 30 min durante 312 horas seguidas mediante una cámara dinámica cerrada de volumen conocido colocada en el suelo, integrada con un analizador de gas infrarrojo (Modelo 8100-104). **Resultados.** Los resultados indican que las emisiones totales en cada manejo fueron 228, 128 y 241 kg CO₂ ha⁻¹ día⁻¹ en un sistema agroforestal con frutales antes, durante y después del pastoreo, respectivamente. La temperatura ambiental influye en la respiración del suelo en los tres manejos. En tanto que la humedad del suelo afecta solo durante y después del pastoreo. **Implicaciones.** Dado que los resultados son limitados, es importante evaluar y analizar durante largos periodos de tiempo para comprender a mejor detalle la Rs de sistemas agroforestales. **Conclusión.** En el análisis de sensibilidad, el incremento de 2°C y 20% en variables como precipitación, temperatura del suelo y humedad del suelo favorecería el incremento del flujo CO₂ del suelo a la atmósfera.

Palabras clave: cambio climático; temperatura del suelo; humedad del suelo; variables ambientales.

INTRODUCCIÓN

El suelo tiene el potencial de actuar como fuente o sumidero de dióxido de carbono (CO₂) (Geissen *et al.*, 2009). El flujo de salida (emisión) de CO₂ del

suelo, también conocido como respiración del suelo (Rs) es una vía importante del ciclo global del carbono (C) (Tang *et al.*, 2006). Desafortunadamente, el cambio de uso de suelo, principalmente a zonas agrícolas, es uno de los más

† Submitted February 25, 2020 – Accepted May 15, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

importantes factores que provoca incremento en la Rs (Kwak *et al.*, 2019). Sin embargo, los sistemas agroforestales (SAF) han mostrado capacidad de almacenar, en promedio, 95 Mg C ha⁻¹ comparado contra un sistema tradicional agrícola con 53 Mg C ha⁻¹ (Soto *et al.*, 2010). Los SAF tienen esencial reconocimiento como estrategia de secuestro de C por su aplicación en tierras agrícolas y programas de reforestación (Montagnini y Nair, 2004). Factores como la temperatura, la humedad del suelo, los atributos químicos y físicos del suelo, el uso y manejo del suelo, influyen en el comportamiento como fuente o emisor de CO₂ (Chi *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2018).

Dentro de los diversos manejos de los SAF, se encuentra el sistema agrosilvopastoril, es un uso del suelo en asociación con especies leñosas (árboles, arbustos, palmas), cultivos agrícolas y animales en el mismo terreno (Musálem-Santiago, 2002), donde los árboles aportan materia orgánica al suelo en forma de hojas, flores, frutos, ramas y raíces muertas que se depositan en la superficie, proporcionando diversos nutrientes que son disponibles para los pastos. Sin embargo, la carga animal provoca compactación de los suelos y el inevitable pastoreo afecta el crecimiento de árboles y la cobertura herbácea (Kwak *et al.*, 2019; Vallejo, 2013). Una gran dificultad es que todavía falta evidencia empírica para explicar cómo los SAF contribuyen a la reducciones de CO₂ en la atmosfera (Montagnini y Nair, 2004). Los SAF han demostrado que tienen alto potencial de almacenamiento de C, y que el manejo es un importante precursor de la Rs (Dollinger y Jose, 2018).

La Rs engloba varios procesos, incluida la respiración por raíces vivas, así como por heterótrofos del suelo y la oxidación química de los detritos de las plantas que conducen a la emisión de CO₂ a través de la superficie del suelo, la cual se ve influenciada por factores climáticos, características biológicas, físicas y químicas del suelo y prácticas de manejo del suelo (Lardo *et al.*, 2015). Determinar las emisión de CO₂ del suelo ayudará a interpretar la dinámica del C (Franzluebbers *et al.*, 2017). Ya que se estima que, un mayor contenido de C en el suelo aumente la emisión de CO₂ (Kwak *et al.*, 2019). Por lo tanto, existe la necesidad de adoptar prácticas sostenibles de gestión del ecosistema para fomentar el secuestro de C en los suelos a fin de reducir la emisión de CO₂ a la atmósfera (Dhillon y Van Rees, 2016).

Por otro lado, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

(SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2018) para el año 2015, emisiones directas de GEI en el territorio mexicano, ascendieron a 700 millones de toneladas de CO₂ equivalente, de las cuales 22.8% corresponden a autotransporte, 20.3% a las actividades de generación de energía eléctrica, 10.1% a ganadería y 6.6% a residuos.

Así, el objetivo del presente estudio fue determinar la variación de las emisiones de CO₂ de acuerdo con a) diferentes manejos: antes, durante y después de pastoreo por ganado; b) influencia de factores ambientales: clima [temperatura del aire (TA), precipitación (PREC), humedad relativa (HR), presión atmosférica (PA), rapidez del viento (RAPV), rapidez de la ráfaga (RAPR), dirección del viento (DIRECV), dirección de la ráfaga (DIRECR) y radiación solar (RADSO)] y suelo [temperatura (Ts) y humedad (Hs)], en las emisiones y, c) ajustar un modelo y evaluar su sensibilidad para dimensionar la aplicabilidad en el comportamiento de la respiración del suelo. Lo anterior con el propósito de abonar en el análisis de la Rs en el sector agrícola nacional que permita focalizar los esfuerzos de mitigación indicados en las metas nacionales determinadas y compromisos adquiridos con el acuerdo de París.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio y sistemas agroforestales

El sitio de estudio es un sistema agrosilvopastoril, que cubre una superficie de 0.05 ha (10 m x 50 m). Se ubica a 2250 msnm y presenta 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. El sitio forma 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 (Gómez y Gómez, 2016) desde hace aproximadamente 20 años.

El sistema agroforestal aplica tecnología de cultivo en callejones con árboles frutales (SAF-A) 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 intercaladas hortalizas (*Beta vulgaris* sp. (acelga), *Lactuca sativa* (lechuga) y *Cucurbita pepo* (calabaza)), arbustos (*Ruta graveolens*) y *Avena sativa* (para pastoreo). Una vez alcanzado el ciclo del cultivo de hortalizas y arbustos se cosechan para dar acceso al pastoreo

de ganado ovino. Este se alimenta de los residuos y la avena en un sistema de pastoreo semi estabulado de las 8:00 h a las 16:00 h. Durante el periodo pastoreo (SAF-DU) se introdujeron 25 borregos y una vez que la avena fue consumida el suelo fue labrado (SAF-DE) con ayuda de un tractor podador.

Diseño experimental

Se estudiaron tres momentos del manejo para evaluar el efecto del pastoreo en la Rs: antes del pastoreo (SAF-A), durante el pastoreo (SAF-DU) y después del pastoreo (SAF-DE). El equipo de medición se colocó durante cinco días en SAF-A, en SAF-DU y SAF-DE cuatro días cada uno, (continuamente día y noche) respectivamente. El total de mediciones fue de 1059.

También se obtuvieron registros meteorológicos diarios de temperatura ambiental (TA), precipitación (PREC), humedad relativa (HR), presión atmosférica (PA), rapidez del viento (RAPV), rapidez de la ráfaga (RAPR), dirección del viento (DIRECV), dirección de la ráfaga (DIRECR) y radiación solar (RADSO) de la estación meteorológica automática Chapingo (MX25) operada por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (<https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas-3>) localizada a 900 m planos del sitio.

Respiración del suelo

La Rs se midió con un equipo portátil 8100A LICOR y dos cámaras, una fija y una de toma rápida (LI-COR 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 (López-Teloxa, Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz, 2020). El diseño experimental consistió en instalar dos cámaras separadas 5 m entre sí para lograr dos observaciones simultáneas cada media hora antes, durante y después del pastoreo. Este procedimiento se llevó a cabo durante 13 días continuos de julio de 2019. Debaeke, Pellerin y Scopel (2017) aseguran que realizar estudios a nivel local ayuda a definir información detallada y soporta las mejores opciones de gestión para hacer frente a la variabilidad climática en curso y los escenarios climáticos futuros en diferentes horizontes temporales. Por otro lado identificar estrategias a corto plazo basadas en prácticas actuales, podría contribuir a la adaptación al cambio climático local

y maximizar el uso de los recursos (Nguyen *et al.*, 2013).

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 (analizador de gas infrarrojo IRGA). La cámara mide durante 90 segundos 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 de CO₂ del suelo por respiración autotrófica (raíces de plantas) y heterotrófica (microorganismos) (Moitinho *et al.*, 2015). La cámara permite además registrar temperatura y humedad del suelo (Ts y Hs respectivamente), con ayuda de sensores incluidos (modelo p/n8150-203 *Soil Temperature Probe* y 8100-204 *Theta Soil Moisture Probe* suelo, respectivamente).

Análisis estadístico

El análisis estadístico fue para tres 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 del suelo y humedad del suelo entre las dos repeticiones y los tres manejos del sistema agroforestal. Los datos se probaron para la normalidad de distribución y la homogeneidad de la varianza antes de ANDEVA cumpliendo satisfactoriamente los criterios para pruebas paramétricas. 2) Se utilizó análisis de correlación Pearson para identificar correlación entre respiración del suelo de tres manejos y las variables climáticas (suelo y ambientales), así como también el análisis de componentes principales entre grupos (ACP) para establecer en qué medida las variables climáticas influyen en la Rs. 3) Para determinar el efecto de las variables climáticas sobre la dinámica de la respiración del suelo se aplicó el análisis de regresión lineal múltiple con eliminación hacia atrás ($\alpha = 0.05$). Consiste en incluir todas las variables en el modelo de regresión y se van eliminando progresivamente de menor a mayor contribución específica hasta que ésta sea lo suficientemente significativa como para no poder ser eliminada (Murcia y Ochoa, 2012; Vittinghoff *et al.*, 2005). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando Minitab R

16.1.0. software estadístico

RESULTADOS

El total de información obtenida fue de 95,130 registros de emisión de CO₂ del suelo por segundo, en un periodo de 312 horas. Los resultados se presentan en el siguiente orden: 1) comportamiento de variables ambientales, 2) variación de emisiones por manejo, 3) análisis estadístico y 4) modelación de la respiración del suelo.

Comportamiento de variables ambientales.

De acuerdo con los registros de las condiciones ambientales, principalmente temperatura y precipitación, se presentaron variaciones significativas durante las tres semanas de evaluación, con base al ANDEVA ($p < 0.05$) (Tabla 1). En la primera semana (correspondiente a SAF_A) la temperatura mínima fue de 9.6°C y máxima de 27°C, mientras que precipitación acumulada fue de 4.51 mm. En la segunda semana (correspondiente a SAF_DU) la temperatura mínima fue de 10.4°C y máxima de 24.4°C, y precipitación acumulada fue 11.39 mm. En la tercera semana (correspondiente a SAF_DE) la temperatura mínima fue de 9.8°C y máxima fue de 24.5°C, mientras que precipitación acumulada fue 2.52 mm. En las figuras 1 y 2 se observan las variaciones de Ts y Hs.

Antes del pastoreo la temperatura media del suelo fue de $19.28 \pm 3.08^\circ\text{C}$ con una mínima de 13.78 y máxima de 25.56°C ; mientras que la humedad

media del suelo fue de $0.18 \pm 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, con una mínima de 0.16 y máxima de $0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Durante el pastoreo, la temperatura media del suelo fue de $17.47 \pm 0.58^\circ\text{C}$, con una mínima de 16.31 y máxima de 18.76°C ; mientras que la humedad media del suelo fue de $0.12 \pm 0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, con una mínima de 0.00 y máxima de $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Después del pastoreo, la temperatura media del suelo fue de $18.28 \pm 2.55^\circ\text{C}$, con una mínima de 13.49 y máxima de 23.85°C ; mientras que la humedad media del suelo fue de $0.43 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, con una mínima de 0.40 y máxima de $0.46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

La temperatura del suelo para el SAF_A y SAF_DE presentan una tendencia similar: a las 11:00 horas presenta incrementos, llegando a su punto máximo a las 14:00 horas, mientras que a 18:00 horas tiende a disminuir. Caso contrario ocurre con humedad del suelo, que a las 12:00 horas, tiende a disminuir, para las mismas intervenciones. Mientras que para SAF_DU, la temperatura se comporta de manera constante a lo largo de los 4 días, presentando incrementos en los mismos horarios. Sin embargo, la humedad en este manejo se comporta de una manera diferente, al inicio de las mediciones del día uno, permanece constante ya que el ingreso del ganado es reciente, alrededor de $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mientras que para el día dos se observa que la humedad disminuye, se atribuye principalmente a la disminución de la cobertura, la incidencia del sol es directa sobre el suelo, provocando la evaporación del agua acumulada, lo mismo ocurre para los dos días siguientes, el contenido de humedad al final del periodo es menor a $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. La cobertura

Tabla 1. Variables ambientales del sitio de estudio.

VARIABLE \ MANEJO	ANTES	DURANTE	DESPUES
PREC (total mm)	4.54	11.39	2.52
PREC (mm)	$0.02 \pm 0.14a$	$0.08 \pm 0.25b$	$0.01 \pm 0.13a$
TA °C	$17.05 \pm 3.65a$	$15.71 \pm 3.23b$	$16.83 \pm 4.02a$
RAPV (km h^{-1})	$5.42 \pm 3.90a$	$4.85 \pm 3.39a$	$5.36 \pm 3.44a$
DIRECV (grados)	$187.76 \pm 110.14a$	$193.16 \pm 108.55a$	$169.90 \pm 104.42a$
RAPR (km h^{-1})	$10.28 \pm 7.15a$	$9.01 \pm 6.26a$	$10.43 \pm 6.75a$
DIRECR (grados)	$225.44 \pm 104.38a$	$223.08 \pm 106.93a$	$207.72 \pm 104.71a$
HR %	$76.95 \pm 15.67a$	$82.60 \pm 15.55b$	$73.71 \pm 16.61a$
RADSO (W m^{-1})	$150.90 \pm 221.40a$	$140.80 \pm 216.60a$	$171.20 \pm 245.00a$
PA (hPa)	$782.32 \pm 1.12a$	$782.98 \pm 1.03b$	$782.04 \pm 1.25a$

PREC = precipitación, TA= Temperatura ambiental, HR=humedad relativa, PA= presión atmosférica, RAPV= rapidez del viento, RAPR = rapidez de la ráfaga, DIRECV = dirección del viento, DIRECR = dirección de la ráfaga y RADSO=radiación solar.

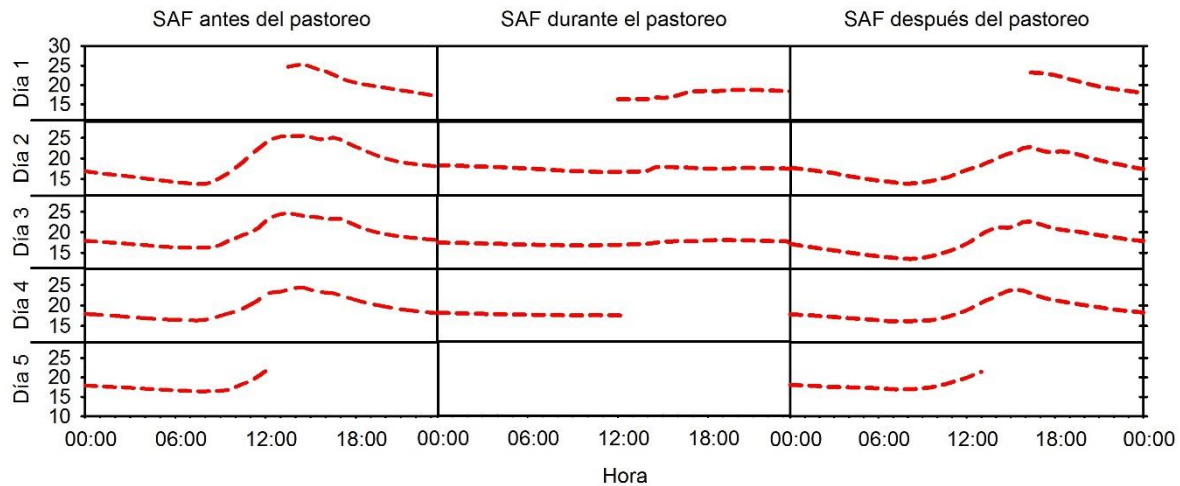


Figura 1. Comportamiento de la temperatura del suelo, °C.

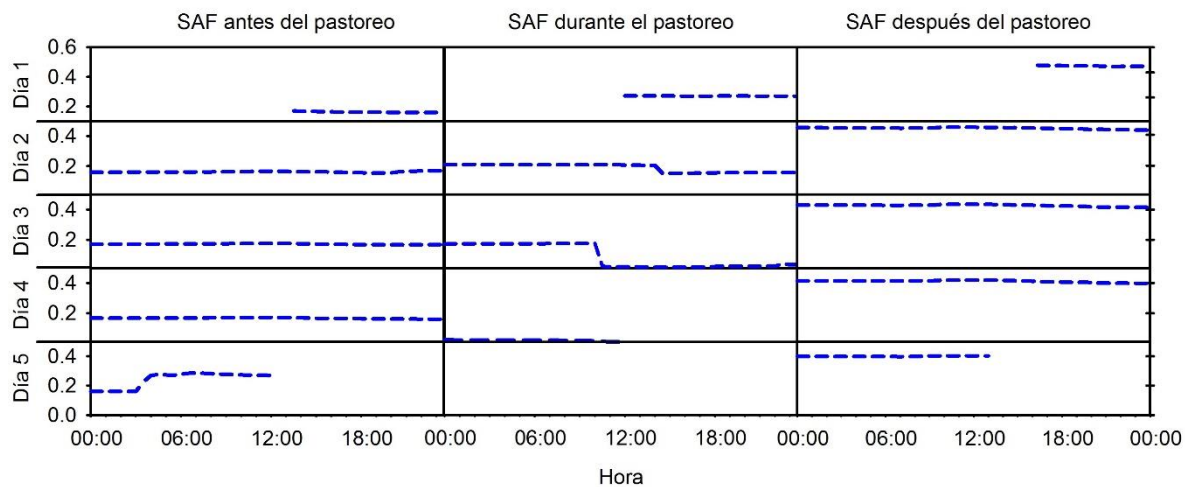


Figura 2. Comportamiento de la humedad del suelo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

vegetal del suelo, proporciona un microclima que conserva la humedad del suelo, sin embargo, al realizar un cambio en la cobertura, se genera un impacto en la R_s , como lo aseguran diferentes autores (Gomes *et al.*, 2016; Yáñez Díaz *et al.*, 2017).

Variación de la respiración del suelo por manejo

En el sistema agroforestal antes del pastoreo, las emisiones totales corresponden a $228 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Las más altas ocurrieron durante el día, entre las 13:00 y 14:30 horas, alcanzando $1.96 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ con temperatura del suelo de 24.08°C y humedad del suelo de $0.16 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Mientras que, durante la noche, se producen las emisiones más bajas entre las 00:00 y 04:00 horas, alcanzando

$0.66 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ con temperatura del suelo de 17.17°C y humedad del suelo de $0.22 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$.

Durante el pastoreo las emisiones totales descienden a $128 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Sin embargo, durante este periodo las emisiones más altas y bajas no presentan una variación similar a antes del pastoreo. Es decir que durante el día se registraron emisiones más bajas que durante la noche. La emisión más alta se registró durante la noche, a las 20:00 horas y de $0.70 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a una temperatura del suelo de 17.73°C y humedad del suelo de $0.21 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Mientras que la más baja se registró durante el día, a las 16:30 horas, de $0.03 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a una temperatura del suelo de 17.80°C y humedad del suelo de $0.15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$.

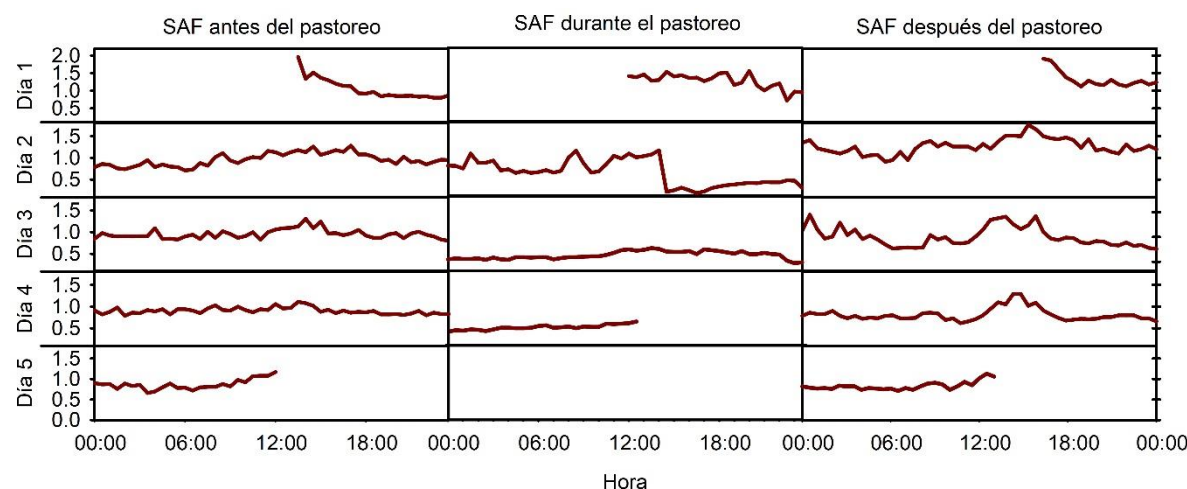


Figura 3. Comportamiento de las emisiones antes, durante y después de pastoreo en $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

Después del pastoreo las emisiones totales corresponden a $241 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, comparado con las dos anteriores es $13 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ más que SAF_A y $113 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ más que SAF_DU. Similar a antes del pastoreo, las más altas ocurren durante el día entre las 14:00 y 15:30 horas alcanzando $0.96 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ con temperatura del suelo de 23.19°C y humedad del suelo de $0.46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Mientras que durante la noche se registraron las emisiones más bajas entre las 04:00 y 05:30 horas, alcanzando $0.33 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ con temperatura del suelo de 18.22°C y humedad del suelo de $0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

En contraste, un sistema de rotación de cultivos trigo-maíz y monocultivo de maíz con labranza convencional, $7.77 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y $9.24 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, respectivamente, con condiciones ambientales similares ya que se localiza en el municipio de Texcoco (Dendooven *et al.*, 2012). Mientras que un sistema silvopastoril en Canadá con temperatura media (más fresca en comparación) de 13°C , emite $230 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y una concentración de 49.5 Mg ha^{-1} (Baah-Acheamfour *et al.*, 2016). Estas diferencias se atribuyen principalmente al contenido de carbono orgánico en suelo (COS) y al porcentaje de raíces en el suelo, ya que de acuerdo con Bain *et al.* (2005), el 80% de la respiración de un sistema corresponde a la suma de la respiración de la raíz viva y microorganismos del suelo, así como también a la descomposición de la residuo vegetal y la materia orgánica del mismo. El COS

almacenado en el suelo del sistema agroforestal antes del pastoreo fue de 81.34 Mg ha^{-1} en los primeros 30 cm de profundidad.

Análisis estadístico

Entre las intervenciones existen diferencias significativas de la R_s , T_s y H_s , corroborado con el análisis de varianza ($p < 0.05$) (Tabla 2). Se presenta un rango promedio de 0.61 a $1.03 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, siendo el de menor flujo SAF_DU, así como menor contenido de agua y temperatura del suelo. Las tres variables se ven afectadas por la incidencia directa del sol, que incrementa la evaporación del agua contenida en el suelo, la cual se ha reportado, es un elemento que controla las emisiones del CO_2 , es decir, a menor cantidad de agua, menor R_s (Gao *et al.*, 2019). Por otro lado, la disminución de T_s se atribuye a la disminución de la temperatura ambiental durante el periodo de evaluación. Sin embargo, la temperatura fue lo suficientemente alta como para disminuir considerablemente el contenido de agua en el suelo y aunado con la pérdida de la cobertura por el pastoreo del ganado ovino, ya que, de acuerdo con Gao *et al.* (2019) y Wang *et al.* (2018), comienza a presentarse desde los 10°C temperatura ambiente. Quiénes además concuerdan que la temperatura tiene una correlación positivamente alta con la transpiración del suelo, es decir, al aumentar la temperatura incrementa la transpiración del suelo, y a la vez, esta incrementa al haber mayor contenido de agua.

Tabla 2. Valores promedio de variables del suelo observadas.

Manejo	Respiración del suelo g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹	Temperatura del Suelo °C	Humedad del Suelo m ³ m ⁻³
SAF_A	0.94±0.17a	19.28±2.54 ^a	0.18±0.09a
SAF_DU	0.61±0.32b	17.46±3.07b	0.12±0.03b
SAF_DE	1.03±0.27c	18.28±0.57c	0.43±0.02c

SAF_A: Sistema agroforestal antes del pastoreo; SAF_DU: Sistema agroforestal durante el pastoreo; SAF_DE: Sistema agroforestal después del pastoreo

Una comparativa de lo anterior, se refléjala en dos sistemas ganaderos de Tabasco, que consisten en cercas vivas conformadas por árboles de *G. sepium* y el segundo, un monocultivo de pasto, donde el suelo presentó un flujo 0.15 g CO₂ m⁻² h⁻¹ y 0.16 g CO₂ m⁻² h⁻¹, con temperaturas del suelo superiores a las aquí reportadas, 29.19°C y 27.95°C, respectivamente. Datos de Hs no se reportan, sin embargo, los autores especifican que la humedad del suelo se conserva debido a la presencia de hojarasca (Villanueva *et al.*, 2014). Por otro lado, en un sistema de rotación de cultivo de caña y *Avena stringosa*, abonado con fertilizante orgánico, en promedio emite 0.32 g CO₂ m⁻² h⁻¹, con temperatura del suelo de 19.48°C y contenido de agua de 17.20 m³ m⁻³ (Moitinho *et al.*, 2015). En un sistema de cultivo de *Leucaena leucocephala* en callejones se registró emisiones de 2.28 g CO₂ m⁻² h⁻¹ con temperatura del suelo 22°C y humedad de 0.25 m³ m⁻³ (Cantú, González y Gomez, 2010).

Modelación de la respiración del suelo

Para las tres intervenciones, la temperatura ambiental influye en la respiración del suelo (Tabla 1). Para el caso específico de SAF_A está influenciado principalmente por variables ambientales, entre las que destacan PREC, RS y TA, que explican el 55.36% de acuerdo al modelo de regresión lineal, esto indica que el flujo de CO₂ del suelo es principalmente el resultado de la respiración autotrófica del suelo, es decir, la respiración de la raíz es impulsada por la fotosíntesis y aumenta con la temperatura del aire (Gomes *et al.*, 2016).

Por otro lado, las variables que influyen en el sistema durante el pastoreo fueron TA, HR, PREC y Hs, explicando el 78% del comportamiento; mientras que después del pastoreo, TA, Ts, Hs, HR, y RAPV, explicaron el 75.11% de la respiración del suelo. Como se aprecia, es la combinación de variables ambientales y del suelo lo que significa que la respiración por parte de microorganismos es mayor, comparado con el caso anterior, principalmente por el proceso de perturbación y

disminución de cobertura lo que conlleva a incremento de temperatura del suelo causando un aumento en la emisión CO₂ del suelo a la atmósfera por la aceleración de la descomposición de la materia orgánica (Liebermann *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2018). De acuerdo con Nelson (2002), las prácticas de manejo afectan las emisiones al cambiar directamente el microambiente del suelo, como la temperatura y la velocidad del viento cerca de la superficie. Ya que, de acuerdo con los resultados, cuando el viento y la ráfaga tienen dirección Noroeste los flujos tienden a ser más altos, del mismo modo cuando la velocidad es alta (10 a 20 km/h). Como lo reporta Asensio *et al.* (2016) y Murcia y Ochoa (2008) quienes aseguran que el viento es un factor meteorológico asociado directamente con el incremento de la respiración del suelo, al afectar la aireación del sustrato superficial incrementando el flujo de CO₂. Aunado a esto la Rs incrementa debido a la temperatura más alta del suelo al mediodía por el estrés en la respiración autotrófica y heterotrófica del suelo, provocado por mayor incidencia de luz y lluvia directo en la superficie del suelo (Gomes *et al.*, 2016). En las 3 intervenciones, se esperaba que la Rs se deba principalmente a la respiración eutrófica, debido a la disminución de cobertura del suelo y a la oxidación de la biomasa (Lei *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019a; Tang *et al.*, 2005).

Como se ha mencionado anteriormente, la humedad en el suelo influye en la Rs, debido a que el incrementar la humedad del suelo aumenta la resistencia del suelo a la difusión de gases inhibiendo el desplazamiento del CO₂ del suelo hacia la atmósfera (Murcia y Ochoa, 2008) aunado a esto en el ámbito local, la Hs explican la variación de la Rs a corto plazo (Liebermann *et al.*, 2020). De acuerdo a los modelos obtenidos mediante al análisis de regresión, en las intervenciones durante y después del pastoreo (Tabla 1), Hs presenta mayor peso, es decir, por cada 1 m³ m⁻³ que ingresa al sistema incrementará 0.23 y 5.1 g CO₂ m⁻² h⁻¹, respectivamente (Murcia y Ochoa, 2012; Wang *et al.*, 2018).

Tabla 3. Ecuaciones de regresión del flujo de CO₂ del suelo en relación con los atributos climáticos (suelo y ambiente) de los sistemas de agroforestales antes, durante y después del pastoreo.

Ecuación	R ²	Variable	Valor p	FIV
Antes CO ₂ = 0.6044 - 0.2356 (PREC) + 0.01797 (TA) + 0.000237 (RADSO)	55.36%	PREC	0.01	1.01
		TA	0.00	2.75
		RADSO	0.00	2.75
Prueba	Durbin-Watson		1.04	
Normalidad de Residuos	Kolmogorov-Smirnov		0.09	
	Anderson Darling		3.61	
Durante CO ₂ = 2.218 + 0.2303 (Hs) - 0.2597 (PREC) - 0.04086 (TA) - 0.01568 (HR)	78.00%	Hs	0.00	1.62
		PREC	0.00	1.06
		TA	0.00	19.88
		HR	0.00	21.74
Prueba	Durbin-Watson		0.89	
Normalidad de Residuos	Kolmogorov-Smirnov		0.08	
	Anderson Darling		0.84	
Después CO ₂ = - 2.581 + 0.01765 (Ts) + 5.160 (Hs) + 0.02141 (TA) - 0.00912 (RAPV) + 0.00356 (HR)	75.11%	Ts	0.00	2.74
		Hs	0.00	1.39
		TA	0.00	23.87
		RAPV	0.00	2.00
		HR	0.01	23.13
Prueba	Durbin-Watson		0.76	
Normalidad de Residuos	Kolmogorov-Smirnov		0.06	
	Anderson Darling		0.66	

PREC = precipitación, TA= temperatura ambiental, RADSO =Radiación solar, Hs=Humedad del suelo, HR=Humedad relativa y RAPV= Rapidez del viento.

DISCUSIÓN

Correlación de emisiones con variables ambientales

La Rs en el sistema agroforestal antes del pastoreo, no presenta correlación con Hs, DIRECV y DIRECR, sin embargo, incrementa cuando lo hacen Ts, RADSO y TA, y cuando disminuye humedad relativa; mientras que, durante el pastoreo, no presentan correlación con Ts, DIRECV y DIRECR, principalmente incrementa al hacerlo la RADSO, TA, RAPV, RAPR y Hs, y cuando disminuye humedad relativa; por último, después del pastoreo, PREC no refleja correlación, sin embargo, la Rs incrementa con forme lo hace Hs, y cuando disminuye PA, lo anterior corroborado con el análisis de correlación de Pearson. Diferente autores (La Scala *et al.*, 2001; Moitinho *et al.*, 2015; Panosso *et al.*, 2009) encontraron que los valores del flujo de CO₂ aumentaron después de eventos de precipitación. De acuerdo con los resultados aquí reportados, la Rs esta correlacionada con el contenido de humedad seguido de los eventos de precipitación (Figura 4) registrados en horarios de nocturnos de los tres manejos (antes, durante y después) por las

estaciones meteorológicas (Tabla 1). Con base en lo anterior, es claro que las prácticas de gestión afectan considerablemente la emisión de CO₂ del suelo (Sainju *et al.*, 2014) al cambiar directamente el microambiente del suelo, como la temperatura y la velocidad del viento cerca de la superficie (Baah-Acheamfour *et al.*, 2016). También, en la entrada de residuos vegetales al sistema, que sirven de protección al suelo, y variando la entrada de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, modificando en su conjunto las propiedades físicas del suelo (Baah-Acheamfour *et al.*, 2016; Jensen *et al.*, 2005).

La perturbación generada por el pastoreo conlleva a degradar el suelo a largo plazo, ya que tienden a afectar los nutrientes del suelo y la vegetación aérea (Li *et al.*, 2019b). Sin embargo, Liebig *et al.* (2006), concuerdan que para detectar cambios en los atributos del suelo a causa de los sistemas de gestión de pastoreo deben realizarse estudios a largo plazo. En otro estudio realizado durante un año para determinar las diferencias de Rs en dos sistemas con pastoreo y sin pastoreo, se encontró que esto no afecta significativamente la respiración del suelo, la variación se atribuyó a la respuesta del sustrato, la disponibilidad de nitrógeno y

proporción de nitratos de amonio que influyen en la respiración del suelo al afectar el crecimiento de las raíces (Fu *et al.*, 2014).

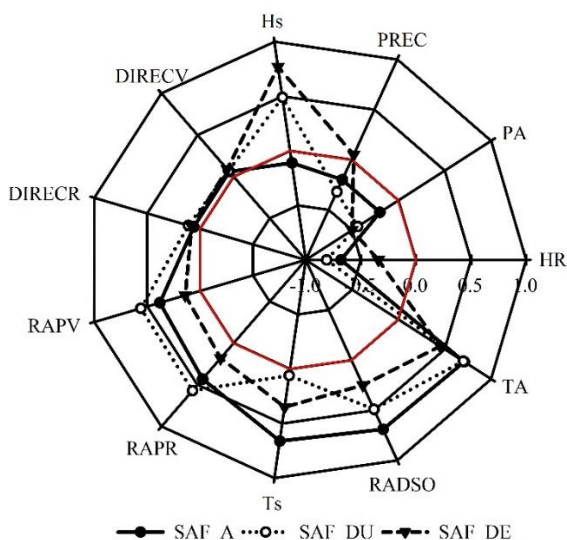


Figura 4. Correlación con variables ambientales de acuerdo con la emisión de CO₂ del suelo. Nota: Variables cercanas a la línea roja no presentan correlación.

Las variables de la Rs la explican dos componentes, las variables ambientales RAPR (0.99), RAPV (0.96), TA (0.94), RADSO (0.86), PREC, PA (-0.99) y HR (-0.98) que explican el 86.10% de la variabilidad (CP1); por otro lado las variables del suelo Ts (0.69) y Hs (-0.64) que explican el 13.90% (CP2). Lo anterior de acuerdo con el análisis de componentes principales (Figura 5), con base al análisis de correlación las variables ambientales DIRECV y DIRECR no presenta correlación para Rs en los tres manejos, por lo que no se tomaron en cuenta para el análisis de ACP.

En lo que se refiere a las variables, la temperatura y humedad del suelo presentan correlación significativa en las emisiones de acuerdo con los análisis de correlación y ACP. A Ts entre 20 a 25 °C y HS de 0.1 a 0.4 m³ m⁻³ las emisiones son más altas, como es el caso del SAF_A (Fig. 1), como lo reporta Srivastava, Sharma, y Kudrat (2012). En el SAF_DU, la temperatura es menor comparada con antes del pastoreo, y con humedad del suelo por debajo de 0.1 m³ m⁻³, lo que provocó la disminución de la respiración del suelo. Similar a lo reportado por Cantú, González, y Gomez (2010) quienes aseguran que la Rs disminuye a valores menores de 5 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, cuando la HS es

menor a 15 %. En el caso de SAF-DE, con rangos similares a antes del pastoreo de Ts, y Hs, las emisiones son más altas ya que la incidencia de factores climáticos influye directamente sobre el suelo. Se ha demostrado que en cultivos de café a pleno sol presentan una Rs de hasta 49.1% mayor respecto del café a la sombra (Gomes *et al.*, 2016). En ambos casos, esto se debe a que la cobertura del suelo ha desaparecido (Fuentes *et al.*, 2012). A causa del manejo, la inestabilidad causada por el pastoreo y perturbación del suelo, causa importantes variaciones como es el caso de SAF-DU (53.58%), por otro lado, en el sistema previo al pastoreo la Rs no presenta variaciones (14.68%), una vez alcanzado un proceso de estabilidad el SAF-DE (25.51%) disminuyó su variación sin llegar al momento inicial (Fig. 1).

Proyección de la Respiración del suelo

En el territorio mexicano, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2018), en el año 2017, se reportaron 8.9 millones cabezas de ganado ovino. Así, realizando una comparación con los datos obtenidos, un sistema de pastoreo con 25 cabezas de borregos produce 6.75 x 10⁻³ Gg CO₂ año⁻¹, comparando esta información para el 2017, con el número de ovinos en el territorio mexicano se produjeron 2,401.84 Gg de CO₂ año⁻¹, suponiendo similares condiciones de manejo a las aquí reportadas; dato que corresponde al 3.4% de las emisiones totales en el sector ganadero, que, de acuerdo con SEMARNAT e INECC (2018) para el año 2015, corresponde a 70,567.60 Gg CO₂e.

Diversas investigaciones han demostrado que los modelos climáticos proyectan fuertes diferencias en las características climáticas regionales entre el calentamiento actual y global entre 1.5°C y 2°C, de las que destacan la temperatura media, fuertes precipitaciones y la probabilidad de déficit de sequía y precipitación en algunas regiones (Allen *et al.*, 2018). Aunado a lo anterior, Gómez *et al.* (2019, 2017) aseguran que el régimen de temperatura y humedad del suelo variarían entre ±10 y ±20% para los años 2042 y 2053, esto asociado con un aumento de la temperatura global promedio de 1.5°C, considerando dos vías de concentración representativas, 4.5 y 8.5 W m⁻² y tres modelos generales de circulación atmosférica, GFDL, HADGEM y MPI. Por otro lado cabe resaltar que las pequeñas perturbaciones y el incremento de 1°C podría liberar entre 11 y 30 Pg de C adicional del suelo a la atmósfera (Knowles, Blanken y Williams, 2015).

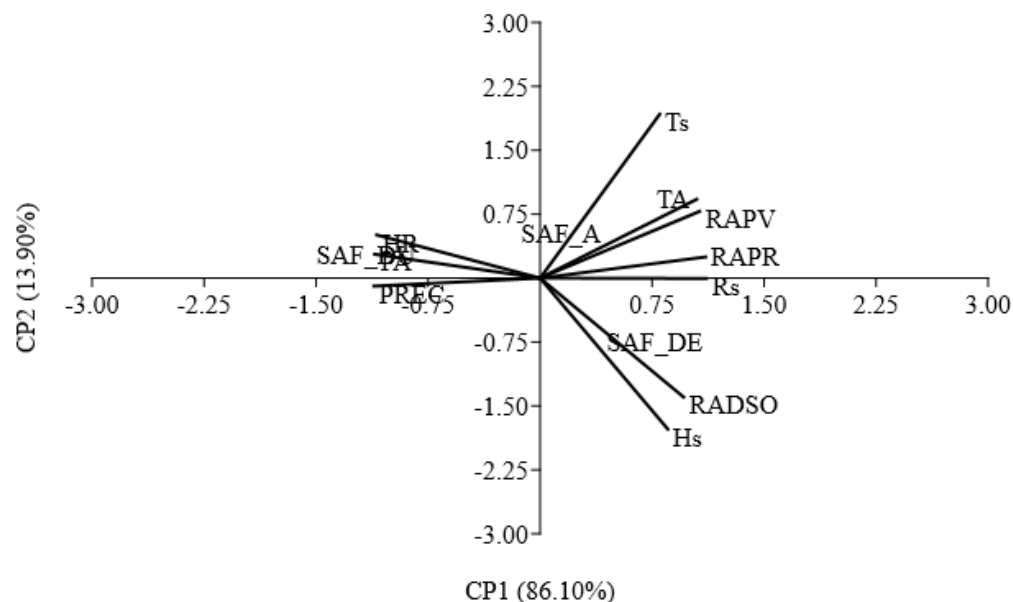


Figura 5. Diagrama biplot de componentes principales.

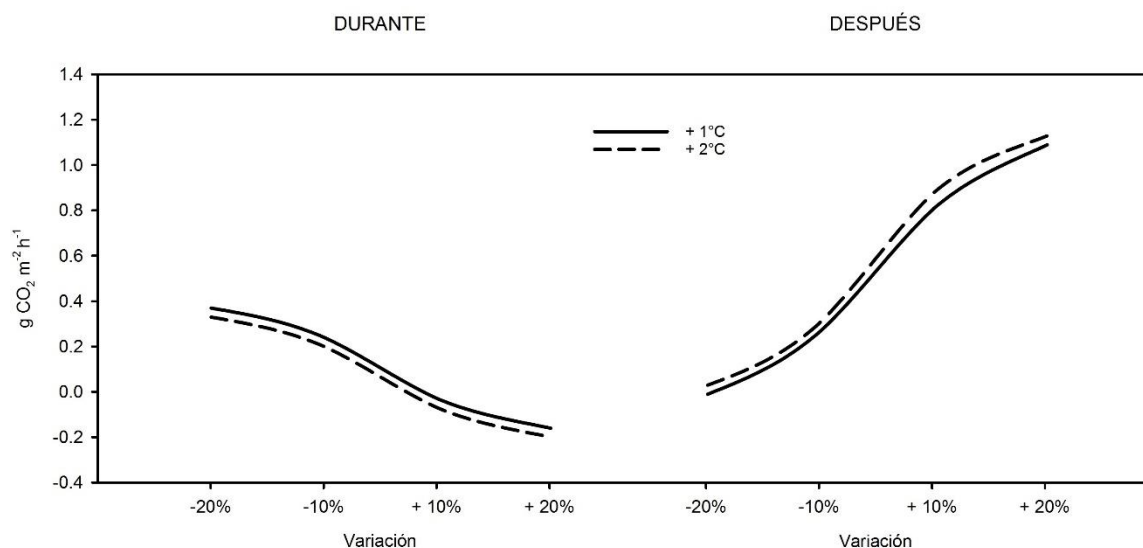


Figura 6. Diagrama de sensibilidad en las emisiones de CO₂ del suelo de acuerdo con escenarios de +1°C y +2°C así como un aumento o disminución de 10 y 20% de lluvia.

Por lo anterior, con los modelos obtenidos y antes presentados se realizó un estudio de sensibilidad al aumentar 1 y 2°C así como ± 10 y $\pm 20\%$ en precipitación, temperatura y humedad del suelo, cabe resaltar que los modelos son realizados a corto plazo y para un SAF con temperatura media anual de 23.5°C. Con base en lo anterior se observa que el comportamiento en las intervenciones como el pastoreo (durante) las emisiones tienden a disminuir hasta 0.4 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en ambos escenarios, siendo menor con +2°C, con el

incremento de precipitación, temperatura del suelo y humedad del suelo (Fig. 5). Caso contrario ocurre con las emisiones después del pastoreo, en ambos escenarios las emisiones tienden a incrementar hasta 1.1 g CO₂ m⁻² h⁻¹.

CONCLUSIONES

En un sistema agroforestal conservado, la respiración del suelo se debe principalmente a la respiración autotrófica. Cabe mencionar que los

mayores valores reportados de R_s se obtuvieron a medio día, por lo que, la temperatura ambiental es el principal factor regulador. El manejo presenta un fuerte impacto en la R_s , ya que altera el microclima, así como las propiedades físicas y químicas del suelo, sin embargo, es importante resaltar que, si bien durante el pastoreo las emisiones registradas son menores, el impacto posterior al pastoreo conlleva a degradar el suelo a largo plazo, aunado a esto la perturbación en el microclima del suelo al aumentar su temperatura causado por la disminución de cobertura favorece la descomposición de raíces o biomasa.

Los datos obtenidos, son los primeros reportados del sitio, por lo que es importante conseguir análisis a lo largo de todo el año para caracterizar el comportamiento en la R_s de sistemas agroforestales, y así, contribuir en la selección de prácticas adecuadas a la conservación del sistema. Cabe resaltar que la R_s es el resultado de un proceso complejo donde interactúan gran cantidad de variables y procesos que lo que en periodos de tiempos cortos no es posible identificar la columna vertebral del proceso. El ACP refleja que las variables ambientales son el principal componente que incrementa o disminuye la respiración del suelo.

El estudio de sensibilidad en la respiración del suelo con un incremento de 2°C temperatura del suelo y ambiental, así como 20% en precipitación y humedad del suelo favorecerá el incremento de hasta 1.1 g CO₂ m⁻² h⁻¹ a la atmosfera en un SAF del centro de México.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada en el programa de segundo año de continuidad de Estancias Posdoctorales Vinculadas al Fortalecimiento de Calidad del Posgrado Nacional 2019 (2). A la Universidad Autónoma Chapingo (DGIP, CIRENAM y Departamento de Suelos) donde se realizó la investigación. Así como a los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron considerablemente a mejorar el manuscrito.

Financiamiento. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada en el programa de segundo año de continuidad de Estancias Posdoctorales Vinculadas al Fortalecimiento de Calidad del Posgrado Nacional 2019 (2).

Conflictos de interés. Se declara que los autores no presentan Conflicto de intereses.

Cumplimiento de estándares de ética. Se han cumplido todos los estándares éticos.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con <Leticia Citlaly López Teloxa, citlaly_lo@hotmail.com > previa solicitud razonable.

REFERENCIAS

- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugeta, Y., Perez, R., Wairiu, M. y Zickfeld, K., 2018. Framing and Context. En: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfiel, eds. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. pp.49–91. Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- Asensio, C., Lozano, F. J., Gallardo, P. y Giménez, A., 2016. Soil wind erosion in ecological olive trees in the Tabernas desert (southeastern Spain): a wind tunnel experiment. *Solid Earth*, [e-journal] 7(4), pp.1233–1242. <https://doi.org/10.5194/se-7-1233-2016>.
- Baah-Acheamfour, M., Carlyle, C. N., Lim, S. S., Bork, E. W. y Chang, S. X., 2016. Forest and grassland cover types reduce net greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Science of the Total Environment*, [e-journal] 571, pp.1115–1127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.106>.
- Bain, W. G., Hutyra, L., Patterson, D. C., Bright, A. V., Daube, B. C., Munger, J. W. y Wofsy, S. C., 2005. Wind-induced error in the measurement of soil respiration using closed dynamic chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, [e-journal] 131, pp.225–232. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.06.004>.

- Cantú, I., González, H. y Gomez, M. V., 2010. CO₂ Efflux in Vertisol under different land use systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, pp.389–403.
- Chi, Y., Yang, P., Ren, S., Ma, N., Yang, J. y Xu, Y., 2020. Effects of fertilizer types and water quality on carbon dioxide emissions from soil in wheat-maize rotations. *Science of The Total Environment*, [e-journal] 698(134010), pp.1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134010>.
- Costa, E. N. D. da, Landim de Souza, M. F. de, Lima Marrocos, P. C., Lobão, D. y Lopes da Silva, D. M., 2018. Soil organic matter and CO₂ fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry. *PLoS ONE*, [e-journal] 13(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200550>.
- Debaeke, P., Pellerin, S. y Scopel, E., 2017. Climate-smart cropping systems for temperate and tropical agriculture: Mitigation, adaptation and trade-offs. *Cahiers Agricultures*, [e-journal] 26(3), pp.1–12. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017028>.
- Dendooven, L., Gutiérrez-Oliva, V. F., Patiño-Zúñiga, L., Ramírez-Villanueva, D. A., Verhulst, N., Luna-Guido, M., Marsch, R., Montes-Molina, J., Gutiérrez-Miceli, F. A., Vásquez-Murrieta, S. y Govaerts, B., 2012. Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Science of the Total Environment*, [e-journal] 431, pp.237–244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.029>.
- Dhillon, G. S. y Van Rees, K. C. J., 2016. Soil organic carbon sequestration by shelterbelt agroforestry systems in saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, [e-journal] 97(3), pp.394–409. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0094>.
- Dollinger, J. y Jose, S., 2018. Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, [e-journal] 92, pp.213–219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>.
- Franzluebbers, A. J., Chappell, J. C., Shi, W. y Cabbage, F. W., 2017. Greenhouse gas emissions in an agroforestry system of the southeastern USA. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, [e-journal] 108(1), pp.85–100. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9809-7>.
- Fu, G., Zhang, X., Yu, C., Shi, P., Zhou, Y., Li, Y., Yang, P. y Shen, Z., 2014. Response of Soil Respiration to Grazing in an Alpine Meadow at Three Elevations in Tibet. *The ScientificWorld Journal*, [e-journal] 2014, p.9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2014/265142>.
- Fuentes, M., Hidalgo, C., Etchevers, J., de León, F., Guerrero, A., Dendooven, L., Verhulst, N. y Govaerts, B., 2012. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. *Plant and Soil*, [e-journal] 355(1–2), pp.183–197. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1092-4>.
- Gao, L., Zhao, P., Kang, S., Li, S., Tong, L., Ding, R. y Lu, H., 2019. Surface soil water content dominates the difference between ecosystem and canopy water use efficiency in a sparse vineyard. *Agricultural Water Management*, [e-journal] 226(July), p.105817. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105817>.
- Geissen, V., Sánchez, R., Kampichler, C., Ramos, R., Sepulveda, A., Ochoa, S., De Jong, B. H. J., Huerta, E. y Hernández, S., 2009. Effects of land-use change on some properties of tropical soils - An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, [e-journal] 151(1), pp.87–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011>.
- Gomes, L. de C., Cardoso, I. M., Mendonça, E. de S., Fernandes, R. B. A., Lopes, V. S. y Oliveira, T. S., 2016. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, [e-journal] 224, pp.30–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>.
- Gómez, J., Monterroso, A. I., Ruiz, P., Lechuga, L. M., Álvarez, A. C. C. y Asensio, C., 2019. Soil moisture regimes in Mexico in a

- global 1.5°C warming scenario. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, [e-journal] 11(4), pp.465–482. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2018-0062>.
- Gómez, J., Monterroso, A., Lechuga, L., Arce, A. y Ruiz, P., 2017. Impact of climate change on soil organic carbon content on agricultural soils of Mexico. En: P. Angelov, J. Iglesias y J. Corrales, eds. *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change*. [e-journal] pp.58–69. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5>.
- Gómez, L. y Gómez, M. A., 2016. El huerto familiar orgánico, diversificado y agroecológico: la experiencia del módulo jurásico en Chapingo, estado de México. En: *Producción, Comercialización y Medio Ambiente*. ECORFAN, pp.131–140.
- Jensen, L. S., Salo, T., Palmason, F., Breland, T. A., Henriksen, T. M., Stenberg, B., Pedersen, A., Lundström, C. y Esala, M., 2005. Influence of biochemical quality on C and N mineralisation from a broad variety of plant materials in soil. *Plant and Soil*, [e-journal] 273(1–2), pp.307–326. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-8128-y>.
- Knowles, J. F., Blanken, P. D. y Williams, M. W., 2015. Soil respiration variability across a soil moisture and vegetation community gradient within a snow-scoured alpine meadow. *Biogeochemistry*, [e-journal] 125(2), pp.185–202. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0122-3>.
- Kwak, J. H., Lim, S. S., Baah-Acheamfour, M., Choi, W. J., Fatemi, F., Carlyle, C. N., Bork, E. W. y Chang, S. X., 2019. Introducing trees to agricultural lands increases greenhouse gas emission during spring thaw in Canadian agroforestry systems. *Science of the Total Environment*, [e-journal] 652, pp.800–809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.241>.
- Lardo, E., Palese, A. M., Nuzzo, V., Xiloyannis, C. y Celano, G., 2015. Variability of total soil respiration in a Mediterranean vineyard. *Soil Research*, [e-journal] 53(5), pp.531–541. <https://doi.org/10.1071/SR14288>.
- Lei, L., Xiao, W., Zeng, L., Zhu, J., Huang, Z., Cheng, R., Gao, S. y Li, M.-H., 2018. Thinning but not understory removal increased heterotrophic respiration and total soil respiration in *Pinus massoniana* stands. *Science of The Total Environment*, [e-journal] 621, pp.1360–1369. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.092>.
- LI-COR Biosciences, 2015. *Using the LI-8100A Soil Gas Flux System*. [en línea] Available at: <http://www.licor.com/env/support/product?p=8100A>.
- Li, R., Zheng, W., Yang, Q., Zhang, W., Chi, Y., Wang, P., Xu, M., Guan, X., Chen, L., Wang, Q. y Wang, S., 2019a. The response of soil respiration to thinning was not affected by understory removal in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *Geoderma*, [e-journal] 353, pp.47–54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.025>.
- Li, Z., Gao, J., Wen, L., Zou, C., Feng, C., Li, D. y Xu, D., 2019b. Dynamics of Soil Respiration in Alpine Wetland Meadows Exposed to Different Levels of Degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Scientific Reports*, [e-journal] 9(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43904-1>.
- Liebermann, R., Breuer, L., Houska, T., Kraus, D., Moser, G. y Kraft, P., 2020. Simulating long-term development of greenhouse gas emissions, plant biomass, and soil moisture of a temperate grassland ecosystem under elevated atmospheric CO₂. *Agronomy*, [e-journal] 10(1), pp.1–17. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010050>.
- Liebig, M. A., Gross, J. R., Kronberg, S. L., Hanson, J. D., Frank, A. B. y Phillips, R. L., 2006. Soil response to long-term grazing in the northern Great Plains of North America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, [e-journal] 115, pp.270–276. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.015>.

- López-Teloxa, L., Monterroso-Rivas, A. I. y Gómez-Díaz, J. D., 2020. Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (respiración) en suelos durante intervalos horarios diurnos. *Agrociencia*, p.En prensa.
- Moitinho, M. R., Padovan, M. P., Panosso, A. R., Teixeira, D. D. B., Ferraud, A. S. y La Scala, N., 2015. On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. *Soil and Tillage Research*, [e-journal] 148, pp.127–132. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.012>
- Montagnini, F. y Nair, P. K. R., 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, [e-journal] 61–62(1–3), pp.281–295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Murcia, M. y Ochoa, M., 2008. Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del bosque Altoandino en la cuenca del Río Pamplonita, Colombia. *Caldasia*, 30(2), pp.337–353.
- Murcia, M. y Ochoa, M., 2012. Respiración del suelo y caída de hojarasca en el matorral del bosque altoandino (Cuenca del Río Pamplonita, Colombia). *Caldasia*, 34(1), pp.165–185.
- Musálem-Santiago, M. Á., 2002. Sistemas agrosilvopastoriles: una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(2), pp.91–100.
- Nelson, R. G., 2002. Resource assessment and removal analysis for corn stover and wheat straw in the Eastern and Midwestern United states - Rainfall and wind-induced soil erosion methodology. *Biomass and Bioenergy*, [e-journal] 22(5), pp.349–363. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00006-5)
- Nguyen, Q., Hoang, M. H., Öborn, I. y van Noordwijk, M., 2013. Multipurpose agroforestry as a climate change resiliency option for farmers: An example of local adaptation in Vietnam Multipurpose agroforestry as a climate change resiliency option for farmers: an example of local adaptation in Vietnam. *Climatic Change*, [e-journal] 117(2013), pp.241–257. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0550-1>
- Panosso, A. R., Marques, J., Pereira, G. T. y La Scala, N., 2009. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. *Soil and Tillage Research*, [e-journal] 105(2), pp.275–282. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.008>
- Sainju, U. M., Stevens, W. B., Caesar-TonThat, T., Liebig, M. A. y Wang, J., 2014. Net global warming potential and greenhouse gas intensity influenced by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization. *Journal of Environmental Quality*, [e-journal] 43(3), pp.777–788. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0405>
- La Scala, N., Lopes, A., Marques, J. y Pereira, G. T., 2001. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, [e-journal] 62(3–4), pp.163–166. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00212-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00212-4)
- SEMARNAT-INECC, 2018. *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático*. SEMARNAT.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2018. *Poblacion ganadera*. Available at: <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762>
- Soto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Jimenez, G. y De Jong, B., 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, [e-journal] 78(1), pp.39–51. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9247-5>
- Srivastava, M., Sharma, S. y Kudrat, M., 2012. Effect of Crop Rotation, soil Temperature and soil moisture on CO₂ emission rate in Indo-Gangetic Plains of India. *International Journal of Agriculture and Forestry*, [e-journal] 2(3), pp.117–120.

- <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20120203.07>.
- Tang, J., Qi, Y., Xu, M., Misson, L. y Goldstein, A. H., 2005. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology*, [e-journal] 25(1), pp.57–66. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.1.57>.
- Tang, X. L., Zhou, G. Y., Liu, S. G., Zhang, D. Q., Liu, S. Z., Li, J. y Zhou, C. Y., 2006. Dependence of soil respiration on soil temperature and soil moisture in successional forests in Southern China. *Journal of Integrative Plant Biology*, [e-journal] 48(6), pp.654–663. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2006.00263.x>.
- Vallejo, V. E., 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, [e-journal] 16(1), p.83. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>.
- Villanueva, G., Casanova, F., Ramírez, L. y Martínez, P., 2014. Influencia del sistema silvopastoril “ceras vivas” de *Gliricidia sepium* en la respiración del suelo en Tacotalpa, Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(2), pp.261–266.
- Vittinghoff, E., Glidden, D. V., Shiboski, S. C. y McCulloch, C. E., 2005. *Linear, Logistic, Survival, and Repeated Measures Models*. Available at: <http://www.springer.com/series/2848>.
- Wang, Y., Zhou, L., Ping, X., Jia, Q. y Li, R., 2018. Ten-year variability and environmental controls of ecosystem water use efficiency in a rainfed maize cropland in Northeast China. *Field Crops Research*, [e-journal] 226(July), pp.48–55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.006>.
- Yáñez Díaz, M. I., Cantú Silva, I., González Rodríguez, H., Jurado, E. y Gómez Meza, M. V., 2017. Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, [e-journal] 8(42), pp.123–149. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.22>.