

Influencia de las biocostras en el flujo de CO₂ en el matorral desértico micrófilo del altiplano mexicano

Influence of biocrusts on the CO₂ flux in the microphyllous desert shrubland of the Mexican plateau

Maritza Gutiérrez-Gutiérrez¹ , Dinorah O. Mendoza-Aguilar¹ ,
Marisela Pando-Moreno¹  y Humberto González-Rodríguez¹ 

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, CAC Ecosistemas Terrestres. Carretera Nacional #85, km 145. 67700 Linares, Nuevo León, México.

✉ Autor de correspondencia (mpando55@hotmail.com)

Editor de Sección: Dr. Fernando Ayala Niño

RESUMEN

El CO₂ del suelo se produce por la mineralización de la materia orgánica y la respiración de organismos del suelo. Las biocostras contribuyen a dicho flujo y son claves en el funcionamiento de ecosistemas áridos y semiáridos. Esta investigación se realizó en áreas de matorral desértico micrófilo donde se seleccionaron cuatro microambientes: área abierta sin biocostras (Aa), área abierta con biocostras (AaC), bajo planta sin biocostras (Bp) y bajo planta con biocostras (BpC). Las biocostras estuvieron constituidas predominantemente por líquenes y cianobacterias. Se probaron las siguientes hipótesis: i) las biocostras contribuyen, en mayor medida que las plantas vasculares de estas áreas, a la respiración del suelo; ii) la respiración del suelo es mayor en los microambientes con biocostras que en áreas abiertas sin biocostras; iii) las tasas de respiración del suelo aumentan conforme aumenta la temperatura del suelo, independientemente de la presencia/ausencia de biocostras. La respiración se midió *in situ* con un equipo EGM-4 con cámara cerrada de respiración de suelo. Los datos se analizaron mediante pruebas de Kruskal Wallis y U de Mann Whitney. La relación entre temperatura y tasa de respiración de suelo se evaluó mediante correlación de Spearman. Los análisis estadísticos se realizaron en el programa SPSS® Statistics versión 19. Los resultados mostraron que la tasa de respiración promedio (3.03 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹)

fue mayor en suelo con biocostras que sin éstas. Las tasas de respiración difirieron entre micrositios. Los microambientes AaC, BpC y Bp presentaron mayores tasas de respiración y fueron iguales entre sí y diferentes de Aa; si bien este último fue igual a Bp. Los resultados mostraron una relación positiva entre respiración y temperatura del suelo para todos los microambientes. Se concluye que las tasas de respiración fueron mayores en las áreas que presentaban cobertura de biocostras ≥ 40%, tanto en presencia como en ausencia de plantas vasculares, que en suelo sin biocostras.

Palabras clave: desierto Chihuahuense, respiración del suelo, tasa de respiración, zonas áridas.

SUMMARY

Carbon dioxide (CO₂) in the soil is produced by mineralization of organic matter and by respiration of soil organisms. Biocrusts contribute to this flux and is a key factor for the functioning of arid and semi-arid ecosystems. This research was conducted in an area of microphyllous desert shrubland in northeastern Mexico. Four microenvironments were selected: open area without biocrusts (Aa), open area with biocrusts (AaC), under plant without biocrusts (Bp) and under plant with biocrusts (BpC). The biocrusts were mainly constituted by lichens and cyanobacteria. The following hypotheses were tested: i) biocrusts

Cita recomendada:

Gutiérrez-Gutiérrez, M., Mendoza-Aguilar, D. O., Pando-Moreno, M. y González-Rodríguez, H. (2022). Influencia de las biocostras en el flujo de CO₂ en el matorral desértico micrófilo del altiplano mexicano. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. e1211. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1211>

Recibido: 18 de diciembre de 2021. Aceptado 14 de abril de 2022.

Artículo. Volumen 40, mayo de 2022.

contribute to soil respiration in these areas to a greater extent than vascular plants; ii) soil respiration is higher in biocrusts microenvironments than in open areas without biocrusts; iii) soil respiration rates increase as soil temperature increases, regardless of the presence/ absence of biocrusts. Soil respiration was measured *in situ* using an EGM-4 equipment with a closed soil respiration chamber. Data were analyzed by Kruskal Wallis and Mann Whitney U tests. The relationship between temperature and soil respiration rate was evaluated with a Spearman correlation analysis. Statistical analyzes were performed in the SPSS® Statistics version 19 software. The results showed that the average respiration rate was higher in soil with biocrusts than in soils lacking biocrusts, with $3.03 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Respiration rates differed between microsites. AaC, BpC and Bp microenvironments reached equal respiration rates among them and were overall higher than the soil respiration rates in Aa, except for Bp, which showed similar values. The results also showed a positive relationship between soil respiration and temperature for all microenvironments. We conclude that the respiration rates were higher in areas with biocrust coverage $\geq 40\%$, compared with soil without biocrusts, both in the presence and absence of vascular plants.

Index words: Chihuahuan desert, soil respiration, respiration rate, arid zones.

INTRODUCCIÓN

La retención de CO_2 en el suelo es de gran relevancia, ya que contribuye al equilibrio de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (Ugas, Calderón, Rivas y Nuñez, 2022). En función del uso, manejo y cobertura vegetal que tenga el suelo, el carbono orgánico de éste (COS) puede ser considerado como reservorio o fuente de dióxido de carbono (González *et al.*, 2011). Así, los flujos entre el COS y la atmósfera pueden ser positivos mientras emiten CO_2 o negativos por captura de éste.

El CO_2 emitido del suelo a la atmósfera se produce por la mineralización de la materia orgánica que realizan los microorganismos del suelo, la respiración autotrófica de las plantas, procesos catabólicos de las micorrizas, respiración de artrópodos, gusanos y en general la fauna edáfica (Hanson, Edwards, Garten y Andrews, 2000), así como la respiración de los organismos formadores de biocostras del suelo.

Las biocostras del suelo son comunidades constituidas por cianobacterias, algas verdes, líquenes, hongos y briofitas en asociación con partículas de suelo. Éstas se distribuyen ampliamente en diversos suelos y en casi todas las comunidades vegetales (Castillo y Maestre, 2011a) especialmente en zonas áridas y semiáridas (Belnap y Lange, 2001a), aunque también es posible encontrarlas en áreas edáficamente secas de zonas templadas (Langhans, Storm y Schwave, 2009) y en zonas polares y alpinas (Maestre, Huesca, Zaady, Bautista y Cortina, 2002). Al igual que las plantas vasculares, las biocostras fijan C atmosférico mediante la fotosíntesis y lo liberan mediante la respiración (Belnap y Lange, 2001a). Además, al ser hábitat de fauna edáfica y microorganismos, las biocostras potencian los flujos del carbono y la transformación de los nutrientes en el suelo a través de la respiración, la descomposición del mantillo y la mineralización de la materia orgánica (Lange, 2001). Las biocostras pueden duplicar el flujo de CO_2 en comparación con el suelo sin biocostras (Sosa *et al.*, 2022) ya que activan el intercambio de gases en presencia de humedad (Belnap y Lange, 2001a). En un estudio llevado a cabo en el desierto del Kalahari se reporta un aumento en la toma de CO_2 mediante la fotosíntesis de cianobacterias al humedecer la superficie del suelo durante la estación seca. Sin embargo, durante la estación húmeda, cuando el subsuelo estaba húmedo, el humedecer la superficie tuvo un efecto mínimo en la respiración de las biocostras; si bien los autores no mencionan el porcentaje de humedad de los suelos en ninguno de los dos casos (Thomas, Hoon y Linton, 2008).

Estudios en España han mostrado una relación positiva entre la cobertura total de biocostras y las tasas de respiración del suelo (Maestre, Escudero, Martínez, Guerrero y Rubio, 2005) o bien sin correlación entre estas dos, pero con mayores tasas de respiración en áreas con biocostras que en áreas de suelo sin biocostras y estas últimas menores que en los micrositios dominados por plantas sin biocostras (Castillo, Maestre, Rey, Soliveres y García, 2011b). Resultados similares se han reportado para una región semiárida y árida de Mongolia, China, donde los valores de respiración fueron mayores bajo la copa de arbustos, que en suelo con solo biocostras y en suelo sin biocostras (Qi *et al.*, 2010). Las áreas dominadas por biocostras contribuyen en mayor medida al carbono total liberado a través de la respiración, tanto en la estación húmeda como en la estación seca, en comparación a los otros dos

microambientes considerados de plantas vasculares y suelo sin biocostras (Castillo *et al.*, 2011b). En Sardinia, Italia, estimaciones *in situ* del flujo de CO₂, mostraron que la condición de suelo con biocostras presenta valores mayores de respiración, mientras que la condición de suelo sin biocostras presentó rangos más bajos (Morillas *et al.*, 2017). Diversos estudios reportan una relación positiva entre la respiración y los factores abióticos de humedad y temperatura (Castillo *et al.*, 2011b; Yao, Bowker y Xiao, 2020). El flujo de CO₂ en las biocostras se correlaciona, en gran medida, con la humedad del suelo, pero también con la radiación y la temperatura (Miralles *et al.*, 2018). En el desierto de Sonora, en Estados Unidos de Norteamérica, se encontró evidencia de la activación de la respiración en las biocostras antes que en las raíces de plantas y microorganismos del suelo al presentarse pequeños pulsos de precipitación (Cable y Huxman, 2004). Investigaciones realizadas en el sur de la península de Baja California, en el noroeste de México concluyen que el suelo con biocostras estimula, directamente, el flujo de CO₂ por respiración durante la estación de lluvias e indirectamente, a través de la descomposición de residuos vegetales al favorecer la abundancia de microartrópodos que degradan la hojarasca (microfitófagos y saprófitos) (Villarreal, Palacios, y Maya, 2014). Los flujos de CO₂ en suelos con biocostras, pueden variar en función de la composición de especies o grupos funcionales que la conforman. Biocostras compuestas mayormente por clorolíquenes (p. ej. *Psora decipiens*, *Placidium squamulosum*) presentaron fotosíntesis neta positiva en condiciones de alta humedad ambiente, mientras que las dominadas por cianolíquenes (p. ej. *Peltula richardsii*, *Peltula patellata*) mostraron una disminución en la absorción de CO₂ bajo condiciones de saturación de humedad (Büdel, Vivas y Lange, 2013). Para localidades situadas al norte de China, se reportan cantidades mayores de CO₂ liberado tras eventos grandes de lluvia (> 20 mm) con respecto a eventos menores (< 5 mm). La variación en la liberación de CO₂ se redujo para biocostras dominadas por algas, no así para las dominadas por musgo (Zhao y Zhang, 2021). Wang *et al.* (2022) sugieren que la composición de las comunidades bacterianas y las propiedades fisicoquímicas del suelo podrían ser los principales responsables de la respuesta de la respiración del suelo a los eventos de precipitación de las biocostras de las zonas áridas.

Tanto en el matorral sarcocaula como en áreas erosionadas de Baja California Sur, en México, se encontraron mayores contenidos de C (1.59 Mg C ha⁻¹) en el suelo con biocostras que en suelo sin biocostras (0.66 Mg C ha⁻¹) y sustancias húmicas de menor complejidad química, las cuales están asociadas a más cantidad de arcillas retenidas en las biocostras y conforman complejos recalcitrantes que son parte importante del C almacenado en el suelo (Montaño *et al.*, 2016). En otro estudio más reciente, para la región semiárida de La Paz, B.C.S., se reportan tasas de respiración de -0.058 a 0.828 μmol s⁻¹ m⁻², donde los valores más altos se obtuvieron para la condición de matorral con biocostras, mientras que los valores más bajos se observaron para la condición de erosión sin biocostras (Ayala, Maya y Troyo, 2018).

Las biocostras son un factor clave para el funcionamiento de los ecosistemas en zonas áridas y semiáridas, sin embargo, nuestra comprensión de éstas requiere ser ampliado a través de la investigación para conseguir un mayor entendimiento del papel ecológico que estos organismos juegan en el ecosistema (Castillo y Maestre, 2011a; Concostrina, Martínez, Huber y Escudero, 2013; Concostrina *et al.*, 2020).

Estudios previos han identificado que la cobertura de biocostras en el área está constituida principalmente por cianobacterias (*Scytonema* y *Microcoleus*) y por líquenes, siendo las especies más frecuentes *Endocarpon pusillum* (Hedw.) y *Collema coccophorum* (Tuck.) (Gutiérrez *et al.*, 2018).

De acuerdo a lo anteriormente descrito, el presente estudio tiene por objetivo determinar la influencia de las biocostras de la zona de estudio en el flujo de CO₂ en el desierto Chihuahuense y aborda las siguientes hipótesis: i) las biocostras contribuyen, en mayor medida que las plantas vasculares de estas áreas, a la respiración del suelo; ii) la respiración del suelo es mayor en los microambientes con biocostras que en áreas abiertas sin presencia de éstas; iii) las tasas de respiración del suelo aumentan conforme aumenta la temperatura del suelo, independientemente de la presencia/ausencia de biocostras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y limita

al oriente con la llanura costera del Golfo Norte y con la gran llanura de Norteamérica (INEGI, 1986). Esta zona corresponde al reino florístico neotropical de la región xerofítica mexicana dentro de la provincia de la altiplanicie (Rzedowski, 1978). El ANP llano La Soledad forma parte de un importante corredor para aves migratorias y residentes como el águila real (*Aquila chrysaetos* Linnaeus) y la lechuza llanera (*Athene cunicularia* Molina). Además, existen poblaciones de tejón (*Taxidea taxus* Baird) y zorra del desierto (*Vulpes velox* Say) como especies clave (CONABIO, 2000), destacando la presencia de colonias de perrito llanero (*Cynomys mexicanus* Merriam), especie endémica catalogada en peligro de extinción de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010, 2010).

La investigación se desarrolló en un área de matorral desértico micrófilo en los límites del área natural protegida (ANP) llano La Soledad, en la región sur del desierto Chihuahuense (24° 47' 10.94" N, 100° 41' 54.39" O; a una altitud de 1900 m), en el municipio de Galeana, Nuevo León, en el noreste de México. Este tipo de vegetación se encuentra en áreas planas o con pendiente muy suave y está constituida mayormente por *Larrea tridentata* ((Moç. & Seseé ex DC.) Coville) (gobernadora), asociada con *Fouquieria splendens* Engelm (ocotillo), *Flourensia cernua* DC. (hojasén), *Zinnia acerosa* DC. (zinia del desierto), *Parthenium incanum* Kunth (mariola), *Jatropha dioica* Cerv. (sangre de drago), *Koerberlinia spinosa* Zucc. (abrojo) y algunos arbustos con espinas (Granados, Sánchez, Granados y Borja, 2011). Además de la cobertura del suelo por la vegetación vascular, el suelo presenta también comunidades de biocostras, las cuales pueden estar constituidas por cianobacterias, algas, líquenes, hongos y briofitas, en asociación con las partículas del suelo. En el área, la mayor cobertura de biocostras la constituyen las cianobacterias de los géneros *Scytonema* y *Microcoleus* y, en segundo lugar, los líquenes, con *Endocarpon pusillum* (Hedw.) y *Collema coccophorum* (Tuck.) como las especies más frecuentes (Gutiérrez *et al.*, 2018). Las características fisiológicas que tienen las biocostras, tales como su resistencia a la desecación y la suspensión temporal de la respiración, les permiten existir en ambientes con fuertes limitaciones hídricas (Belnap *et al.*, 2001b).

El clima corresponde al tipo BSok (x'): árido, templado, con una temperatura media de 15.8 °C, una temperatura media mensual máxima de 32.7 °C en

junio y una media mínima de -1 °C en enero (García, 1981; CONABIO, 2000; CNA, 2021). La precipitación promedio anual es de 400.8 mm, con media máxima mensual en julio (69.15 mm) y media mínima mensual en marzo (13.03 mm) (CNA, 2021). Los datos climatológicos específicos para los meses considerados en el presente estudio se detallan en el Cuadro 1.

Método

Para evaluar la respiración del suelo se delimitó un área de 30 ha (Figura 1) donde fueron seleccionadas cuatro condiciones de microambiente: área abierta sin biocostras o con una cobertura menor al 5% (Aa), área abierta con un 40-50% de cobertura de biocostras (AaC), bajo planta sin biocostras (Bp) y bajo planta con biocostras (BpC). Gutiérrez *et al.* (2018) determinaron que las especies vasculares dominantes en el área de estudio son: *Larrea tridentata* y *Parthenium incanum*, con frecuencias relativas de 13% y 9%, respectivamente y de suelo 42%; asimismo, reportan una cobertura promedio de biocostras de 17.8% bajo planta y de 8.8% en área abierta. Los microambientes bajo planta se ubicaron bajo alguna de las dos especies dominantes

Cuadro 1. Datos de precipitación mensual y temperatura promedio mensual, para el área de estudio, en el tiempo de medición.

Table 1. Monthly precipitation data and monthly average temperature for the study area, at the time of the measurement.

Año	Mes	Precipitación	Temperatura	
		mm	°C	
2015	Junio	156.3	20.2	
	Julio	25	20.7	
	Agosto	22.7	20.8	
	Septiembre	42.1	20.2	
	Octubre	72.2	16.6	
	Noviembre	13.1	15.8	
	Diciembre	3.3	11.7	
	Enero	36.6	7.8	
	Febrero	1.6	12.2	
	Marzo	19.9	14.5	
	2016	Abril	10.3	17.9
		Mayo	92.6	20.4
Junio		37.2	20.3	

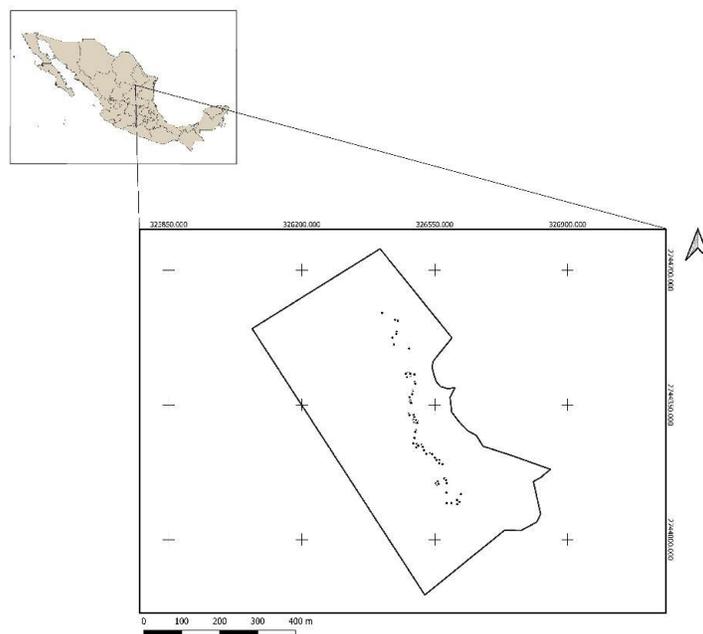


Figura 1. Delimitación del área de estudio en el ANP llano La Soledad, municipio de Galeana, Nuevo León y ubicación de los puntos de muestreo fijos para los microambientes considerados.

Figure 1. Delimitation of the study area in the NPA llano La Soledad, municipality of Galeana, Nuevo León and fixed sampling points for the microenvironments considered.

antes mencionadas. Se establecieron 15 puntos al azar para cada condición de microambiente en área abierta (Aa y AaC) y 30 puntos para cada condición de microambiente bajo planta (Bp y BpC), a fin de contar con 15 repeticiones bajo *L. tridentata* y 15 bajo *P. incanum*; dando un total de 90 puntos de muestreo. Un mes previo a iniciar las mediciones se colocaron anillos de PVC, con un diámetro de 10.5 cm y una altura de 7 cm, en cada punto de muestreo (Figura 2). Los anillos se ubicaron a una distancia promedio de 20 m para puntos de un mismo microambiente (Figura 1). El uso de anillos de PVC insertados en el suelo, de forma permanente, evita lecturas erróneas a causa de la alteración del suelo durante la instalación del equipo en cada lectura (Castillo *et al.*, 2011b).

Los registros de respiración del suelo se realizaron bimestralmente (julio, septiembre y noviembre de 2015; enero y mayo de 2016) entre las 11:00 y las 13:00 horas. Se considera que, en este rango de horas, los valores de respiración del suelo registrados son representativos de los valores diarios promedio en pastizales semiáridos (Mielnick y Dugas, 2000; Frank, Liebig y Hanson, 2002; Maestre y Cortina, 2003) y

los flujos anuales estimados proporcionan una buena aproximación sin un sesgo o sobreestimación muy alta (Castillo *et al.*, 2011b). La respiración del suelo se midió *in situ* con un equipo portátil EGM-4 (Environmental[®] PP-Systems, Hitchin, UK, serial No. EGM0976) (Figura 3) junto con una cámara cerrada de respiración de suelo SRC-1 (Environmental[®] PP-Systems, Hitchin, UK). A fin de mantener las mediciones dentro de las horas del día pre-establecidas (11:00 a 13:00 horas), la mitad de las muestras se midió en un día y la otra mitad al día siguiente. Adicionalmente a las medidas de respiración, se obtuvieron medidas de temperatura del suelo a través del diodo incluido en el equipo.

Los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad (prueba de Kolmogorov-Smirnov), ni de homocedasticidad (estadístico de Levene) por lo que para determinar si la respiración del suelo varía entre los microambientes considerados, de manera general y por mes, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, seguida de la prueba U de Mann Whitney. La relación entre las variables temperatura y tasa de respiración de suelo se evaluó con un análisis de correlación (ρ de Spearman (Dytham, 2011). Todos

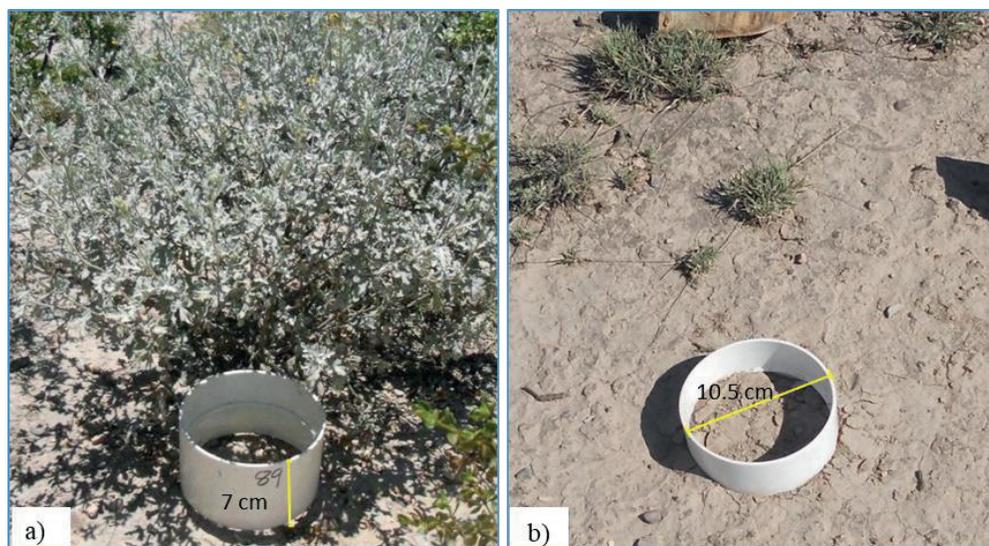


Figura 2. Instalación de anillos de PVC en los puntos de muestreo fijos para cada microambiente: a) bajo planta (*Parthenium incanum*), b) área abierta.

Figure 2. PVC rings installation at the fixed sampling points for each microenvironment: a) under plant (*Parthenium incanum*), b) open area.

los análisis estadísticos se realizaron en el programa SPSS® Statistics versión 19 (IBM, 2019), con excepción de la regresión, para la cual se empleó el software Microsoft Excel®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tasa de respiración promedio para los microambientes estudiados fue de $3.03 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($0.481 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Dicha tasa de respiración es mayor a lo reportado para una región árida y semiárida de Italia, donde áreas de suelo sin biocostras presentan entre 0.80 y $2.17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0.126 y $0.343 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) y para el microambiente de suelo + biocostras osciló entre 1.36 y $2.59 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0.21 y $0.41 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (Morillas *et al.*, 2017).

La tasa de respiración fue mayor ($U = 16776.5$, $g1 = 1$, $P = 0.004$) en el suelo cubierto por biocostras ($0.546 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \pm 0.028 \text{ EE}$) que en el suelo sin biocostras ($0.415 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \pm 0.022 \text{ EE}$). Estos resultados coinciden con investigaciones llevadas a cabo en España, Italia y China, en las que se reporta una relación positiva entre la respiración del suelo y la cobertura de biocostras (Maestre *et al.*, 2005; Castillo *et al.*, 2011b; Morillas *et al.*, 2017; Yao *et al.*, 2020).

La tasa de respiración no presentó diferencias en función de la planta vascular bajo la cual se midió. La tasa de respiración bajo *L. tridentata* sin biocostras fue

igual que bajo *P. incanum* ($P = 0.128$). Asimismo, los valores de respiración fueron iguales para *L. tridentata* con biocostras y *P. incanum* también con biocostras ($P = 0.354$). Debido a ello, se consideró, en lo sucesivo, solo como microambiente bajo planta (Bp), sin diferenciar entre especies vasculares.

Las tasas de respiración difirieron entre micrositios ($H = 9.822$; $P = 0.020$). El área abierta sin biocostras (Aa) y el área bajo planta (Bp) fueron los microambientes que presentaron los valores más bajos y fueron iguales entre sí ($0.388 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $0.442 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente). Los microambientes de área abierta con biocostras (AaC) y bajo planta con biocostras (BpC) presentaron mayores tasas de respiración de suelo ($0.582 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $0.510 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) y fueron estadísticamente iguales a Bp y diferentes de Aa (Cuadro 2). Resultados similares documentan Castillo *et al.* (2011b) al no encontrar diferencias entre las tasas de respiración para los micrositios dominados por biocostras en una región semiárida de España y con valores más altos que en áreas abiertas. Sin embargo, reportan valores más altos para el micrositio bajo planta de esparto (*Stipa tenacissima* L.) que para suelo con biocostras, a diferencia de lo encontrado en el presente estudio.

Las diferencias de respiración encontradas en los microambientes de estudio, particularmente entre los suelos sin biocostras y los suelos con biocostras



Figura 3. Equipo portátil EGM-4 (Environmental® PP-Systems, Hitchin, UK).

Figure 3. EGM-4 portable equipment (Environmental® PP-Systems, Hitchin, UK).

suponen que la mayoría de los modelos de flujos de CO₂ subestiman los valores reportados ya que no consideran la contribución de las biocostras. Esta contribución es relevante particularmente en las zonas áridas y semiáridas donde la cobertura de biocostras puede llegar a 95% como es el caso reportado en Yao *et al.* (2020).

Es probable que el valor obtenido en el microambiente bajo planta con biocostras (BpC) en la presente investigación refleje un efecto complementario de las especies vasculares y las biocostras debido, particularmente, a las condiciones de suelo creadas bajo las plantas donde seguramente hay un mayor contenido de materia orgánica y ésta tiene un efecto en la respiración. Adicionalmente, el tipo de cobertura vegetal puede afectar significativamente los índices de respiración (Huang *et al.*, 2020). En un estudio realizado en un área de matorral desértico en el desierto Chihuahuense, en el noreste de México, sin que reporten presencia de biocostras, Campuzano, Delgado y Flores (2021) estimaron un valor de respiración de 1.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valor inferior al promedio registrado en esta investigación (3.03 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), en suelos con contenidos de materia orgánica entre 3.6 y 4.0%. Otros investigadores (Yáñez *et al.*, 2017) reportan valores de respiración muy superiores (6.17 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en suelos con un contenido de materia orgánica

de 6.1% en el matorral espinoso tamaulipeco y, en contraste, Leon *et al.* (2014) mencionan valores de 0.97 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para otras áreas de matorral en Baja California.

Con las tasas diarias de respiración se determinaron los aportes anuales de CO₂-C a la atmósfera para cada condición. Las zonas de suelo sin biocostras contribuyen, mediante la respiración, con 1002 g CO₂-C m⁻² año⁻¹, mientras que las zonas de suelo con biocostras liberan 1263 g CO₂-C m⁻² año⁻¹, lo cual representa un aporte mayor de 261 g CO₂-C m⁻² año⁻¹ atribuibles al efecto de las biocostras, siendo mayor a lo reportado para la meseta de Loess, China, donde con una cobertura del 95% de biocostras se confirmó un aporte mayor en 187 g CO₂-C m⁻² año⁻¹ para las áreas con biocostras (Yao *et al.*, 2020). Si bien en el presente estudio se evidencia un flujo mayor de CO₂ a la atmósfera por efecto de las biocostras, también cabe señalar que dichos microambientes favorecen el almacén de C en el suelo y su disponibilidad en mayor medida que los suelos sin biocostras, creando así “mantos de fertilidad” (Sandoval *et al.*, 2016). Además, las biocostras pueden retener arcillas que forman complejos importantes para el almacenamiento de C (Montaño *et al.*, 2016).

Dado que no toda el área se encuentra cubierta de biocostras y considerando que la cobertura promedio de éstas en el área de estudio es de 13.3% (Gutiérrez

Cuadro 2. Respiración y temperatura del suelo para cada microambiente.
Table 2. Soil respiration and temperature for each microenvironment.

Microambientes	n	Respiración del suelo	Tprom.	Tmo.	Tmáx.	Tmín.
		g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹				
Área abierta sin biocostras (Aa)	15	0.388 ± 0.037 a	24	23	37	9
Área abierta con biocostras (AaC)	15	0.582 ± 0.057 b	23	25	33	8
Bajo planta sin biocostras (Bp)	30	0.442 ± 0.027 a,b	22	28	38	7
Bajo planta con biocostras (BpC)	30	0.510 ± 0.031 b	23	26	33	6
Promedio para todos los microambientes		0.481 ± 0.018	23	26	38	6

Valores promedio ± error estándar. Las letras de la columna derecha indican igualdad o diferencia significativa entre los microambientes según la prueba de U de Mann Whitney ($P \leq 0.05$). Valores promedio de temperatura para cada microambiente (Tprom.); moda (Tmo.); temperatura máxima (Tmáx.); temperatura mínima (Tmín.).

Mean ± standard error. Letters in the right column indicate equality or significant difference between the microenvironments according to the Mann Whitney U test ($P \leq 0.05$). Mean temperature values for each microenvironment (Tprom.); mode (Tmo.); maximum temperature (Tmax.); minimum temperature (Tmin.).

et al., 2018), se estimó que, por metro cuadrado, el flujo de CO₂-C proveniente de la respiración en el área con biocostras es de 168 g m⁻² año⁻¹, mientras que, en el suelo sin biocostras, que ocupa el 42% del área, es de 420 g m⁻² año⁻¹. Los datos obtenidos difieren de los reportados para la meseta de Loess donde determinaron que el área con biocostras aporta 390 g CO₂-C m⁻² año⁻¹ y el suelo sin biocostras 203 g CO₂-C m⁻² año⁻¹ (Yao *et al.*, 2020). Lo anterior debido, probablemente, a una mayor cobertura de biocostras (95%) constituidas por musgos a diferencia de nuestra área, donde predominan líquenes y cianobacterias. Dentro de estas últimas, el género *Scytonema*, predominante en el área de estudio, se caracteriza por su capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico al contar con heterocistos y puede llegar a constituir la principal fuente de nitrógeno en las regiones áridas (Belnap *et al.*, 2001b). Entre los líquenes presentes, particularmente *Endocarpon pussilum* contribuye a la agregación de las partículas del suelo mediante sus rizinas por lo que juega un papel relevante en la estabilización de los suelos, reduciendo la erosión (Zhang *et al.*, 2017).

Al analizar la relación entre la tasa de respiración del suelo y su temperatura, en presencia y ausencia de biocostras del suelo, los resultados muestran que existe relación entre dichas variables: en los microambientes con biocostras (AaC + BpC) ($r = 0.390$; $P < 0.001$) y sin biocostras (Aa + Bp) ($r = 0.356$; $P \leq 0.001$). Asimismo, se determinó que existe relación entre dichas variables a nivel de cada microambiente: Aa ($r = 0.513$; $P \leq 0.001$), AaC ($r = 0.249$; $P = 0.038$), Bp ($r = 0.314$; $P \leq 0.001$) y BpC ($r = 0.452$; $P \leq 0.001$). Por lo que la hipótesis

que afirma la existencia de una relación entre la temperatura del suelo y su tasa de respiración es aceptada para todos los casos. De manera semejante, en una región semiárida en la Península Ibérica se reporta una relación positiva entre las variables temperatura y respiración del suelo cuando la humedad de éste es mayor a 11% (Castillo *et al.*, 2011b).

CONCLUSIONES

En esta investigación, los microambientes bajo planta mostraron tasas de respiración similares cuando debajo de éstas había biocostras (BpC) que cuando carecían de éstas (Bp), por lo que se rechaza la primera hipótesis planteada que establece que: las biocostras contribuyen, en mayor medida que las plantas vasculares de estas áreas de estudio, a la respiración del suelo.

Para áreas abiertas, se confirma que la tasa de respiración es mayor cuando el suelo está cubierto por biocostras que cuando está desprovisto de éstas, corroborando así la segunda hipótesis planteada donde se menciona que la respiración del suelo es mayor en los microambientes con biocostras que en áreas abiertas sin presencia de éstas. La tasa de respiración de suelo mostró correlación directa, de débil a moderada, con la variable temperatura del suelo, aceptando con ello, la tercera hipótesis que así lo afirma.

Con los resultados de esta investigación proporcionamos una estimación bastante precisa de la contribución de las biocostras en el ciclo del carbono a nivel de ecosistema.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, definición de metodología, administración del proyecto, revisión y edición del escrito: M.P.M. Preparación del borrador original, trabajo de laboratorio, análisis y conservación de datos originales: M.G.G. Supervisión del trabajo de laboratorio, revisión de análisis estadísticos y del escrito: H.G.R. Ajuste de la metodología, edición del escrito: D.M.A. Aportación de recursos: M.P.M y M.G.G.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a CONACyT por la beca otorgada para sus estudios de doctorado, de los cuales emana la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y., & Troyo-Dieguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 93-104. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334>
- Belnap, J., & Lange, O. L. (Eds.). (2001a). *Biological soil crust: structure, function and management*. Berlin, Germany: Springer. ISBN: 978-3-540-43757-4
- Belnap, J., Kaltenecker, J., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S., & Eldridge, D. (2001b). *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*. Denver, CO, USA: U.S. Department of the Interior-Bureau of Land Management-U.S. Geological Survey.
- Büdel, B., Vivas, M., & Lange, O. L. (2013). Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja California, Mexico). *Ecological Processes*, 2(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-6>
- Cable, J. M., & Huxman, T. E. (2004). Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crust. *Oecologia*, 14(2), 317-324. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1461-7>
- Campuzano-Granados, E. F., Delgado-Balbuena, J., & Flores-Rentería, D. Y. (2021). Controlling factors of ecosystem and soil respiration in a xeric shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.1251>
- Castillo-Monroy, A. P., & Maestre, F. T. (2011a). La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(1), 1-21. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100001>
- Castillo-Monroy, A. P., Maestre, F. T., Rey, A., Soliveres, S., & García-Palacios, P. (2011b). Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem. *Ecosystems*, 14(5), 835-847. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9449-3>
- CNA (Comisión Nacional del Agua). (2021). *Proyecto De Bases De Datos Climatológicos, San Rafael, Galeana*. México: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Consultada el 19 de abril, 2021, desde <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Mensuales/nl/00019057.TXT>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2000). Tokio. En L. Arriaga, J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez, & E. Loa (Coord.). *Regiones terrestres prioritarias de México* (pp. 342-344). Consultada el 2 de diciembre, 2020, desde http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_080.pdf
- Concostrina-Zubiri, L., Martínez, I., Huber-Sannwald, E., & Escudero, A. (2013). Efectos y respuestas de la costra biológica del suelo en ecosistemas áridos: avances recientes a nivel de especie. *Ecosistemas*, 22(3), 95-100. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.13>
- Concostrina-Zubiri, L., Valencia, E., Ochoa, V., Gozalo, B., Mendoza, B. J., & Maestre, F. T. (2020). Species-specific effects of biocrust-forming lichens on soil properties under simulated climate change are driven by functional traits. *New Phytologist*, 230(1), 101-115. <https://doi.org/10.1111/nph.17143>
- Dytham, C. (2011). *Choosing and using statistics: A biologist's guide*. Third edition. Oxford, United Kingdom: WileyBlackwell.
- Frank, A. B., Liebig, M. A., & Hanson, J. D. (2002). Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(9), 1235-1241. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00062-7)
- García-Amaro, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, México: IG-UNAM
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J. D., Paz-Pellat, F., Díaz-Solis, H., Fuentes-Ponce, M. H., Covaleda-Ocón, S., & Pando-Moreno, M. (2011). Performance of the RothC-26.3 model in short-term experiments in Mexican sites and systems. *Journal of Agricultural Science*, 149(4), 415-425. <https://doi.org/10.1017/S0021859611000232>

- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados Victorino, R. L., & Borja de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 111-130. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.10.102>
- Gutiérrez, M., Pando-Moreno, M., Jurado, E., González-Rodríguez, H., Marmolejo, J. G., & Mendoza, D. (2018) Non-random distribution of biocrust in a natural arid environment in the Northern Mexican Plateau. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(3), 2441-2451. http://dx.doi.org/10.15666/aecer/1603_24412451
- Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T., & Andrews, J. A. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48(1), 115-146. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>
- Huang, N., Wang, L., Song, X., Black, T. A., Jassal, R. S., Myneni, R. B., ... Niu, Z. (2020). Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Science Advances*, 6(41), eabb8508. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8508>
- IBM (2019) *IBM SPSS Statics for Windows User's Guide. Version 19*. Armonk, NY: IBM Corp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1986). *Síntesis geográfica del estado de Nuevo León*. México: INEGI.
- Lange, O. L. (2001). Photosynthesis of soil-crust biota as dependent on environmental factors. In J. Belnap, & O. L. Lange (Eds.). *Biological soil crusts: structure, function, and management* (pp. 217-240). Berlin, Germany: Springer. ISBN: 978-3-540-43757-4
- Langhans, T. M., Storm, C., & Schwave, A. (2009). Community assembly of biological soil crust of different successional stages in a temperate sand ecosystem as assessed by direct determination and enrichment techniques. *Microbial Ecology*, 58(2), 394-407. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9532-x>
- Leon, E., Vargas, R., Bullock, S., López, E., Panoso, A. R., & La Scala, N. Jr. (2014). Hot spots, hot moments, and spatio-temporal control son soil CO₂ efflux in a water-limited ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 77, 12-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.029>
- Maestre, F. T., Huesca, M., Zaady, E., Bautista, S., & Cortina, J. (2002). Infiltration, penetration resistance and microphytic crust composition in contrasted microsites within a Mediterranean semi-arid steppe. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(6), 895-898. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00021-4)
- Maestre, F. T., & Cortina, J. (2003). Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 23(3), 199-209. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(03\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(03)00050-7)
- Maestre, F. T., Escudero, A., Martínez, I., Guerrero, C., & Rubio, A. (2005). Does spatial pattern matter to ecosystem functioning? Insights from biological soil crusts. *Functional Ecology*, 19(4), 566-573. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01000.x>
- Mielnick, P. C., & Dugas, W. A. (2000). Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(2), 221-228. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00150-9)
- Miralles, I., Ladrón de Guevara, M., Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Ortega, R., Wesemael, B., & Cantón, Y. (2018). Soil CO₂ exchange controlled by the interaction of biocrust successional stage and environmental variables in two semiarid ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 124, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.020>
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R., ... Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39-59.
- Morillas, L., Bellucco, V., Lo Cascio, M., Marras, S., Spano, D., & Mereu, S. (2017). Contribution of biological crust to soil CO₂ efflux in a Mediterranean shrubland ecosystem. *Geoderma*, 289, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.012>
- NOM-059-SEMARNAT-2010 (Norma Oficial Mexicana). (2010). Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- Qi, Y., Dong, Y., Jin, Z., Peng, Q., Xiao, S., & He, Y. (2010). Spatial heterogeneity of soil nutrients and respiration in the desertified grasslands of Inner Mongolia, China. *Pedosphere*, 20(5), 655-665. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60055-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60055-0)
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México* (pp. 504). Distrito Federal, México: Limusa.
- Sandoval-Pérez, A. L., Camargo-Ricalde, S. L., Montaño, N. M., García-Oliva, F., Alarcón, A., Montaño-Arias, S. A., & Esperón-Rodríguez, M. (2016). Biocrusts, inside and outside resource islands of *Mimosa luisana* (Leguminosae), improve soil carbon and nitrogen dynamics in a tropical semiarid ecosystem. *European journal of soil biology*, 74, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.006>
- Sosa-Quintero, J., Godínez-Alvarez, H., Camargo-Ricalde, S. L., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Huber-Sannwald, E., Jiménez-Aguilar, A., ... Rivera-Aguilar, V. (2022). Biocrusts in Mexican deserts and semideserts: A review of their species composition, ecology, and ecosystem function. *Journal of Arid Environments*, 199, 104712. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104712>
- Thomas, A. D., Hoon, S. R., & Linton, P. E. (2008). Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari. *Applied Soil Ecology*, 39(3), 254-263. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.015>
- Ugas-Pérez, M., Calderón-Castellanos, R., Rivas-Meriño, F., & Núñez-Ravelo, F. (2022). Cuantificación del flujo de CO₂ en el suelo colonizado por *Avicennia germinans*, emplazado en el humedal Laguna Grande, sector Los Totumos, estado Miranda, Venezuela. La Granja: *Revista de Ciencias de la Vida*, 35(1), 85-97. <http://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.07>
- Villarreal-Rosas, J., Palacios-Vargas, J. G., & Maya, Y. (2014). Microarthropod communities related with biological soil crusts in a desert scrub in northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(2), 513-522. <https://doi.org/10.7550/rmb.38104>
- Wang, Y., Hong, Y., Tian, Y., Tian, G., Zhang, J., Wu, H., ... Qian, J. (2022). Changes in bacterial community composition and soil properties altered the response of soil respiration to rain addition in desert biological soil crusts. *Geoderma*, 409, 115635. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115635>

-
-
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J. G., Jurado, E., & Gómez-Meza, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 123-149.
- Yao, X., Bowker, M. A., & Xiao, B. (2020). Estimation of annual CO₂ efflux of moss biocrust through measuring and simulating its respiration rate in a semiarid climate. *Geoderma*, 376, 114560. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114560>
- Zhang, T., Liu, M., Wang, Y., Wang, Z., Wei, X., & Wei, J. (2017). Two new species of Endocarpon (Verrucariaceae, Ascomycota) from China. *Scientific Reports*, 7(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07778-5>
- Zhao, Y., & Zhang, P. (2021). Rainfall characteristics determine respiration rate of biological soil crusts in drylands. *Ecological Indicators*, 124, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107452>