

Análisis Metodológico de la Respiración del Suelo: Un Planteamiento para su Interpretación Methodological Analysis of Soil Respiration: An Approach to Interpretation

Víctor Manuel Montoya-Jasso¹ , Víctor Manuel Ordaz-Chaparro^{1*} ,
Gerardo Sergio Benedicto-Valdés¹ , Alejandrina Ruiz-Bello¹  y
Jesús Manuel Arreola-Tostado² 

¹ Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México; (V.M.M.J.), (V.M.O.C.), (G.S.B.V.), (A.R.B.).

* Autor para correspondencia: ordaz@colpos.mx

² Consultor agrícola privado. Apaseo el Grande No. 114, Col. Guanajuato. 38010 Celaya Guanajuato, México; (J.M.A.T.).

RESUMEN

Se propone una metodología para la interpretación de las emisiones de gases que proceden del suelo a partir de la integración de los actores primarios en los sistemas de producción e integrantes de los ecosistemas. La metodología presenta datos en unidades de fácil comprensión por personas ajenas al estudio de emisiones de gases en los distintos ecosistemas y sistemas de producción, optimiza el cálculo de predicciones a pequeña y mediana escala mediante la estimación con alto grado de razón y ajuste matemático. A partir del empleo de la ecuación general de los gases ideales se pudo desarrollar la metodología para obtener un factor de conversión teniendo en cuenta variables como la presión y temperatura del sitio donde se esté ejecutando el experimento de cuantificación de gases, con lo anterior se facilita la obtención de la constante del volumen molar propio del contenedor utilizado y la transformación de datos para garantizar el cumplimiento de parámetros estadísticos básicos como normalidad, varianza similar a cero e intervalos de confianza con menor desviación. El presente desarrollo metodológico representa una herramienta para la generación de datos a nivel de laboratorio y parcelario con soporte matemático que facilita la ejecución de modelos matemáticos en comparación con otras metodologías.

Palabras clave: carbono, emisiones agrícolas, gases de efecto invernadero, mineralización.

SUMMARY

A methodology is proposed for the interpretation of gas emissions that come from the soil based on the integration of the primary actors in the production systems and members of the ecosystems. The methodology presents data in units that are easy to understand by people outside the study of gas emissions in different ecosystems and production systems, and optimizes the calculation of small and medium scale predictions through estimation with a high degree of ratio and mathematical adjustment. From the use of the ideal gas equation, it was possible to develop the methodology to obtain a conversion factor taking into account variables such as the pressure and temperature of the site where the gas quantification experiment is being carried out. With the aforementioned, it is easier to obtain the constant of the molar volume of the container used and data transformation to ensure compliance with basic statistical parameters such as normality, variance similar to zero, and confidence intervals with less deviation. The present methodological development represents a tool for the generation of data at the laboratory and plot level with mathematical support that facilitates the execution of mathematical models in comparison with other methodologies.

Index words: carbon, agricultural emissions, greenhouse gases, mineralization.



Cita recomendada:

Montoya-Jasso, V. M., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Ruiz-Bello, A., & Arreola-Tostado, J. M. (2024). Análisis Metodológico de la Respiración del Suelo: Un Planteamiento para su Interpretación. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-6. e1822. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1822>

Recibido: 1 de diciembre de 2023.
Aceptado: 27 de diciembre de 2023.
Nota de Investigación. Volumen 42.
Marzo de 2024.

Editor de Sección:
Dr. Francisco Bautista Zúñiga

Editor Técnico:
Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2024 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

INTRODUCCIÓN

Esta metodología tuvo su base en una pregunta muy generalizada desde el punto de vista de la comprensión por las personas ajenas al tema de cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero: ¿cuánto gas estamos emitiendo a la atmósfera por superficie y volumen de suelo? Algunos de los argumentos de la pregunta anterior recaen en la transferencia del conocimiento generado en laboratorio y campo a los productores, estudiantes y lectores que no están familiarizados con la terminología de interpretación de emisión de gases por el suelo; otro factor fue la simplificación de las unidades a términos de mayor comprensión y extrapolación a valores en función de la superficie de terreno bajo interés de análisis.

El constante cambio de uso de suelo y las actividades humanas como los manejos de tierras agrícolas, la deforestación, el pastoreo (Lai *et al.*, 2012), aunado al desfase de las condiciones climáticas (Zhang, Zhao, Fu, Zhao y Jia, 2020); han repercutido en la evolución de los almacenes de carbono del suelo lo que ha ocasionado incrementos en las tasas de respiración del suelo (Shi, Yan, Zhang, Guan y Du, 2014). Existen diferentes herramientas y técnicas para medir la respiración del suelo, entre las que resalta el uso de cámaras dinámicas (Saynes-Santillan y Ramírez, 2018) que basan su medición en la concentración de CO₂ a través de un sensor por infrarrojo (Luo y Zhou, 2006). La interpretación de las emisiones de CO₂ por parte del suelo comúnmente se reportan como $\mu\text{M CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Schlesinger y Andrews, 2000; Maier, Schack, Hildebrand y Schindler, 2011) y $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Mo *et al.*, 2008; Ding, Yu, Cai, Han y Xu, 2010), lo que representa una complejidad de comprensión y reafirma la necesidad de ejecución de cálculos extra para conocer el valor total por unidad de superficie como posible referencia para su divulgación.

Dada la reciente tendencia en el empleo de herramientas informáticas conjugadas con disciplinas matemáticas para la modelación matemática relacionada con la respiración del suelo como los modelos estocásticos (Daly, Oishi, Porporato y Katul, 2008), modelos unidimensionales (Cook, Thomas, Kelliher y Whitehead, 1998) y modelos autorregresivos integrados de media móvil con variables de intervención (García-Ferrer, y Bujosa, 2000; Montoya-Jasso *et al.*, 2022) por mencionar algunos; esta metodología podría resultar en la simplificación, aclaración y descomposición de problemas originales que se resuelven en estimaciones con mayor rango de razón que facilita el proceso de modelaje, identificación y predicción al emplear logaritmos (Albarracín y Arlenbäck, 2022).

De esta forma, el objetivo de la metodología propuesta fue potencializar la forma en que se reportan las emisiones de gases procedentes del suelo como una herramienta para facilitar la comprensión y visualización de datos en razón de superficie y volumen de terreno.

METODOLOGÍA

Marco General

Es sustancial partir del conocimiento de las variables necesarias para obtener el volumen molar del gas, resulta importante conocer el número de moles presentes en la unidad experimental donde se ha realizado la medición para poder extrapolar los datos en función del sitio de interés particular, comenzamos con la ecuación general de los gases ideales propuesta paralelamente por Kröning (1856) y Clausius (1857) y modificada por Mendeleev (1877) en el año 1877 (Ecuación 1).

$$PV = nRT \quad (1)$$

Dónde: P = presión; V = volumen; n = moles; R = constante de los gases ideales y T = temperatura.

Al medir el flujo del CO₂ podemos obtener datos en unidades de mg kg^{-1} , aunado a ello, durante la ejecución de las mediciones se deberán registrar parámetros como la temperatura ambiental, la presión interna (Montzka, Dlugokencky y Butler, 2011) y el volumen del recipiente donde se esté midiendo el flujo del gas ya que las condiciones y concentraciones dentro de la cámara dinámica resultan en una magnitud mayor en comparación con aquellas presentes en la atmósfera. En el caso de la presión será necesario utilizar los valores en unidades de atmósferas (atm), el volumen en litros (L) y la temperatura en °K, lo anterior teniendo en cuenta las unidades de medición y de la constante R para evitar errores experimentales que incurran por la distorsión de los datos y gradientes obtenidos (Saynes-Santillan y Ramírez, 2018). A continuación, se presentan las unidades de manejo para cada variable:

P = atm

V = L

n = mol

R = 0.08206 L atm mol⁻¹°K⁻¹

T = °K

La primera incógnita a resolver es el valor de n , el cual se obtiene despejando n en la Ecuación 1, obteniendo la Ecuación 2:

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (2)$$

Una vez obtenido el dato de los moles de gas presentes en el contenedor donde se mide el flujo del gas, lo siguiente es calcular el volumen molar (V_m) del gas. Dado que el V_m de un gas es una propiedad intensiva, representa el volumen molar del gas y está ligado a las condiciones de presión y temperatura específicas (Levine, 2014), por lo tanto, será el valor más importante para obtener el factor de conversión para expresar el flujo de gas en un volumen unitario. Para obtener el valor del V_m se emplea la Ecuación 3:

$$V_m = \frac{PV}{n} \quad (3)$$

El resultado de la Ecuación 4 corresponde a la concentración, en mg kg^{-1} normalizados, que se liberan ($x \text{ mg kg}^{-1}$), como regla general el resultado de la Ecuación 4 deberá ser menor a 1 indicando que el V_m debe ser menor al peso molecular del gas.

$$x \text{ mg kg}^{-1} = \frac{V_m}{\text{Peso molecular del gas}} \quad (4)$$

El penúltimo paso es obtener un factor de conversión (FC) realizando una transformación recíproca (Ecuación 5) para disminuir el sesgo en la distribución de los datos (Estévez y Sardón, 2013) y acercar los valores a su media estadística y obtener intervalos de confianza con menor desviación típica de los datos (Estévez, 2009).

$$FC = \frac{1}{x \text{ mg kg}^{-1}} \quad (5)$$

Para finalizar, se debe multiplicar el factor de conversión por los mg kg^{-1} obtenidos en cada una de las lecturas realizadas. Este último valor representa la emisión del gas en mg m^{-3} de suelo (Ecuación 6).

$$\text{mg de CO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ de suelo} = \text{mg kg}^{-1} \text{ obtenidos} * FC \quad (6)$$

APLICACIÓN Y RESOLUCIÓN

Para ejemplificar el desarrollo de las ecuaciones mencionadas en el apartado del Marco General de la Metodología se utilizaron datos reales obtenidos en laboratorio y en campo:

En un ensayo de emisiones de CO_2 en laboratorio durante 45 días, donde la temperatura fue controlada a $24.63 \text{ }^\circ\text{C}$ ($297.78 \text{ }^\circ\text{K}$) durante todo el periodo de ejecución, se utilizaron botes de plástico con tapa hermética y volumen de 0.5 L y se midieron las emisiones de CO_2 y la presión dentro del bote de plástico con apoyo de un analizador de gases por infrarrojo (IRGA) marca PPSsystems modelo EGM-4. Al finalizar el ensayo la presión promedio obtenida fue de 0.0001588 atm y la emisión acumulada fue de $61\ 720.279 \text{ mg kg}^{-1}$ de CO_2 . Aplicando las ecuaciones 2 a 6, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\text{Ec. 2 } n = \frac{0.0001581 \text{ atm} * 0.5 \text{ L}}{0.08206 \text{ L atm mol}^{-1}\text{K}^{-1} * 297.78 \text{ }^\circ\text{K}} = \frac{0.00007905}{24.4358268} = 0.000003235 \text{ mol}$$

$$\text{Ec. 3 } V_m = \frac{0.0001581 \text{ atm} * 0.5 \text{ L}}{0.000003235 \text{ mol}} = 24.43585781 \text{ L mol}^{-1}$$

$$\text{Ec. 4 } x \text{ mg kg}^{-1} = \frac{24.43585781 \text{ L atm mol}^{-1}}{44.01 \text{ g mol}} = 0.555 \text{ mg kg}^{-1}$$

$$\text{Ec. 5 } \text{Factor de conversión} = \frac{1}{0.555 \text{ mg kg}^{-1}} = 1.80$$

$$\text{Ec. 6 } \textit{Emisión} = 61\,720.279 \text{ mg kg}^{-1} * 1.80 = 111\,096.5022 \text{ mg de CO}_2 \text{ m}^3 \text{ de suelo}$$

La expresión de las emisiones de gases en mg por unidad de volumen de suelo (mg m^{-3}) facilita una visualización más objetiva de las emisiones producidas en una superficie dada considerando una profundidad definida. Así, una superficie de una hectárea con una profundidad de muestreo de 30 cm, considerando el valor obtenido en la ecuación 6 y el hecho de que 1 kg está compuesto por 1 millón de mg, emite un total de 333.289 kg de $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$:

$$\textit{Volumen total de suelo} = 10\,000 \text{ m}^2 * 0.30 \text{ m} = 3\,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$$

$$\textit{Emisión (mg)} = 111\,096.5022 \text{ mg de CO}_2 \text{ m}^3 * 3\,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} = 333\,289\,506.60 \text{ mg de CO}_2 \text{ ha}^{-1}$$

$$\textit{Emisión (kg)} = 333\,289\,506.60 \text{ mg de CO}_2 \text{ ha}^{-1} * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1\,000\,000 \text{ mg}}\right) = 333.289 \text{ kg de CO}_2 \text{ ha}^{-1}$$

Para ejemplificar la emisión de CO_2 a nivel de campo, se utilizaron los datos generados por Campuzano-Granados, Delgado y Flores (2021) donde se realizaron mediciones en el suelo de un ecosistema de matorral xerófilo en el norte de México. Las condiciones de temperatura presentaron una media de $36.31 \text{ }^\circ\text{C}$, equivalente a $309.46 \text{ }^\circ\text{K}$, se empelaron collares de PVC con 10 cm de diámetro y ocho cm de altura dando como resultado un volumen de 0.63 L. Las emisiones de CO_2 y la presión dentro del collar de PVC se midieron con de un analizador de gases por infrarrojo, PPSystems modelo EGM-5, obteniendo una emisión promedio de $433.53 \text{ mg kg}^{-1}$ de CO_2 mientras que la presión media obtenida fue de 0.84 atm. Aplicando las ecuaciones 2 a 6, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\text{Ec. 2 } n = \frac{0.84 \text{ atm} * 0.63 \text{ L}}{0.08206 \text{ L atm mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1} * 309.46 \text{ }^\circ\text{K}} = \frac{0.5292}{25.3942876} = 0.02083933 \text{ mol}$$

$$\text{Ec. 3 } V_m = \frac{0.84 \text{ atm} * 0.63 \text{ L}}{0.02083933 \text{ mol}} = 25.39429051 \text{ L mol}^{-1}$$

$$\text{Ec. 4 } x \text{ mg kg}^{-1} = \frac{25.39429051 \text{ L atm mol}^{-1}}{44.01 \text{ g mol}} = 0.577 \text{ mg kg}^{-1}$$

$$\text{Ec. 5 } \textit{Factor de conversión} = \frac{1}{0.577 \text{ mg kg}^{-1}} = 1.73$$

$$\text{Ec. 6 } \textit{Emisión} = 433.53 \text{ mg kg}^{-1} * 1.73 = 750.0069 \text{ mg de CO}_2 \text{ m}^3 \text{ de suelo}$$

Así, una hectárea de matorral xerófilo, con una profundidad de muestreo de 15 cm y bajo las condiciones del ensayo, emitió 1.125 kg de $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ durante el periodo de medición:

$$\textit{Volumen total de suelo} = 10\,000 \text{ m}^2 * 0.15 \text{ m} = 1\,500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$$

$$\textit{Emisión (mg)} = 750.0069 \text{ mg de CO}_2 \text{ m}^3 * 1\,500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} = 1\,125\,010.35 \text{ mg de CO}_2 \text{ ha}^{-1}$$

$$\textit{Emisión (kg)} = 1\,125\,010.35 \text{ mg de CO}_2 \text{ ha}^{-1} * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1\,000\,000 \text{ mg}}\right) = 1.125 \text{ kg de CO}_2 \text{ ha}^{-1}$$

Para cotejar la correlación entre las unidades convencionales de interpretación de la respiración del suelo y las unidades de la metodología propuesta, se emplearon datos reales de emisión de CO_2 del suelo y se transformaron a las diferentes unidades. Al realizar comparaciones entre los parámetros estadísticos, se obtuvo lo siguiente:

En el Cuadro 1 se muestra el porcentaje del error relativo de las unidades de interpretación de la respiración del suelo, siendo similares en las tres unidades reportadas lo que las respalda con diferencias mínimas en sus aproximaciones. La variabilidad de los datos respecto a su media y su desviación estándar varían significativamente

Cuadro 1. Parámetros estadísticos entre unidades de interpretación de la respiración del suelo.
Table 1. Statistical parameters among soil respiration interpretation units.

Unidad	Media	ER	Var	DE	CV
		%			
mg m ⁻³	1 810.77	11	58 600.32	242.07	0.1336
mg m ² h ⁻¹	26.18	10	12.25	3.50	0.1336
μM m ⁻² s ⁻¹	16.49	11	4.86	2.21	0.1336

ER = error relativo; Var = varianza; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.
 RD = relative error; Var = variance; SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

por efectos de los rangos y magnitud de los datos, siendo los mg m⁻³ aquellas unidades que ostentan una mayor varianza y desviación estándar, la menor varianza y desviación estándar la representan los μM m⁻² s⁻¹. No obstante, la dispersión de los datos entre sí, y respecto a la media, es igual entre las tres unidades reportadas (0.1336) lo que expone la factibilidad de rendimiento y confiabilidad de las unidades de interpretación.

CONCLUSIONES

El desarrollo metodológico descrito representa una herramienta para generar soporte matemático en la utilización de datos generados en laboratorio y su extrapolación en función de la superficie y sitio de interés como producto de la simplificación de la información final obtenida y su facilitación para la ejecución de procedimientos matemáticos en la resolución y modelización de aspectos ambientales. Los parámetros estadísticos de las unidades comparadas muestran el impacto de los datos obtenidos en la representatividad de la correlación de las diferentes unidades de interpretación de la respiración del suelo como consecuencia de la magnitud, orden y rango de los datos bajo los supuestos de representatividad y dinámica por efectos de factores independientes por lo que se recomienda realizar gráficos de dispersión para identificar datos atípicos y detectar la presencia de relaciones espurias.

Si bien es cierto que la validación metodológica ofrece un vasto desafío científico que puede ocasionar la reticencia a emplearla, el desarrollo y/u optimización de soluciones a inquietudes complejas comunes o en constante estudio involucra la exploración de alternativas y conceptos que contribuyan a la generación de estrategias para hacer frente a los desafíos y oportunidades de aprendizaje que sean aplicables y comprensibles para el receptor final de la información, sin que éste tenga que involucrarse en procesos de desarrollo y validación.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Los autores declaran la aprobación por parte de la Dra. Dulce Yaahid Flores-Rentería (yaahid.flores@cinvestav.edu.mx) para emplear datos reportados en el proyecto de investigación "Controlling factors of the ecosystem and soil respiration in a xeric shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico".

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: V.M.M.J. Metodología: V.M.M.J. y A.R.B. Validación: A.R.B. y V.M.O.Ch. Análisis formal: V.M.M.J., V.M.O.Ch. y G.S.B.V. Investigación: V.M.M.J. y J.M.A.T. Preparación de borrador original: V.M.M.J., V.M.O.Ch. y A.R.B. Escritura, revisión y edición: V.M.M.J., V.M.O.Ch., G.S.B.V., A.R.B. y J.M.A.T.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por el apoyo de beca para formación de posgrado del autor principal. A Emmanuel F. Campuzano, Josué Delgado-Balbuena y Dulce Yahid Flores-Rentería por el apoyo en la facilitación de datos para ejemplificar el apartado "Aplicación y resolución metodológica" en su caso de campo.

LITERATURA CITADA

- Albarracín, L., & Ärlenbäck, J. B. (2022). Esquemas de resolución de problemas de Fermi como herramienta de diseño y gestión para el profesor. *Educación Matemática*, 34(2), 289-309. <https://doi.org/10.24844/EM3402.11>
- 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>
- Clausius, R. (1857). Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. *Annalen der Physik*, 176(3), 353-380. <https://doi.org/10.1002/andp.18571760302>
- Cook, F. J., Thomas, S. M., Kelliher, F. M., & Whitehead, D. (1998). A model of one-dimensional steady-state carbon dioxide diffusion from soil. *Ecological Modelling*, 109(2), 155-164. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00034-9)
- Daly, E., Oishi, A. C., Porporato, A., & Katul, G. G. (2008). A stochastic model for daily subsurface CO₂ concentration and related soil respiration. *Advances in Water Resources*, 31(7), 987-994. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.04.001>
- Ding, W., Yu, H., Cai, Z., Han, F., & Xu, Z. (2010). Responses of soil respiration to N fertilization in loamy soil under maize cultivation. *Geoderma*, 155, 381-389. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.023>
- Estévez, P. G. (2009). Reciprocal transformations for a spectral problem in 2+1 dimensions. *Theoretical and Mathematical Physics*, 159(3), 762-768. <https://doi.org/10.1007/s11232-009-0064-9>
- Estévez, P. G., & Sardón, C. (2013). Miura-reciprocal transformations for non-isospectral Camassa-Holm hierarchies in 2 + 1 dimensions. *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, 20(4), 552-564. <https://doi.org/10.1080/14029251.2013.868268>
- García-Ferrer, A., & Bujosa-Brun, M. (2000). Forecasting OCDE turning points using unobserved components models with business survey data. *International Journal of Forecasting*, 16(2), 207-227. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(99\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(99)00049-7)
- Kröning, A. K. (1856). Grundzüge einer Theorie der Gase. *Annalen der Physik*, 175(10), 315-322. <https://doi.org/10.1002/andp.18561751008>
- Lai, L., Zhao, X., Jiang, L., Wang, Y., Luo, L., Zheng, Y., ... & Rimmington, G. M. (2012). Soil respiration in different agricultural and natural ecosystems un an arid region. *Plos One*, 7(10), e48011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048011>
- Levine, I. N. (2014). *Principios de fisicoquímica*. (Sexta edición). D.F., México: Mc Graw Hill.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). *Soil Respiration and the Environment*. Cambridge, MA, USA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.01.008>
- Maier, M., Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E. E., & Schindler, D. (2011). Soil CO₂ efflux vs. soil respiration: Implications for flux models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1723-1730. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.006>
- Mendeleeev, D. (1877). Mendeleef's researches on Mariotte's law. *Nature*, 15(388), 498-500. <https://doi.org/10.1038/015498a0>
- Montoya-Jasso, V. M., Ramírez-Guzmán, M. E., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Ojeda-Trejo, E., & Gutiérrez-Castorena E. V. (2022). Impacto de la regulación ambiental en las emisiones agrícolas de N₂O en México. En F. Ayala-Niño, F. López-Valdez, G. Medina-Pérez, N. A. Sigala-Aguilar, & F. Fernández-Luqueño (Eds.). *Innovación y suelos sanos para el desarrollo sustentable, 46 Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo* (pp. 763-767). Ciudad de México, México: SMCS. ISBN: 978-607-9023-67-6.
- Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., & Butler, J. H. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476, 43-50. <https://doi.org/10.1038/nature10322>
- Mo, J., Zhang, W. E. I., Zhu, W., Gundersen, P. E. R., Fang, Y., Li, D., & Wang, H. U. I. (2008). Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 14(2), 403-412. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01503.x>
- Saynes-Santillan, V., & Ramírez-Bribiesca, E. (2018). El uso de la cromatografía de gases en investigaciones de emisiones de gases de efectos invernadero del sector pecuario. *Agro Productividad*, 11(2), 81-88.
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7-20. <https://doi.org/10.1023/A:1006247623877>
- Shi, W. Y., Yan, M. J., Zhang, J. G., Guan, J. H., & Du, S. (2014). Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. *Atmospheric Environment*, 88, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.066>
- Zhang, Y., Zhao, W., Fu, L., Zhao, C., & Jia, A. (2020). Land use conversion influences soil respiration across a desert-oasis ecoregion in Northwest China, with consideration of cold season CO₂ efflux and its significance. *Catena*, 188, 104460. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104460>