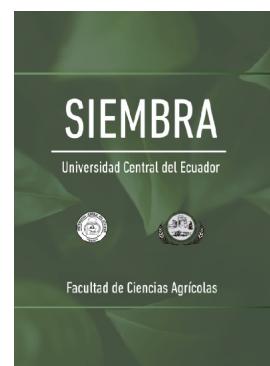


Estudio del efecto del sistema de cultivo en la salud del suelo en la Estación de Investigación Agrícola del Noroeste de Ontario (Canadá)

Understanding the effect of cropping system on soil health at the Northwestern Ontario Agricultural Research Station in Canada

Paul Benalcazar¹



Siembra 11 (2) (2024): e6816

Recibido: 28/06/2024 / Revisado: 07/08/2024 / Aceptado: 02/10/2024

Resumen

¹ Guelph University. School of Environmental Design and Rural Development. 50, Stone Road. Guelph, Ontario, Canada.
✉ benalcap@upguelph.ca
✉ <https://orcid.org/0000-0002-2213-0549>

*Autor de correspondencia:
benalcap@uoguelph.ca

Las actividades antropogénicas afectan el suelo en diversos grados, desde la conservación de los paisajes naturales hasta la agricultura intensiva, entre cuyas prácticas agrícolas se encuentran los sistemas de cultivo. Pero, aún falta información sobre los sistemas de cultivo y su impacto en el suelo en los territorios del norte de Canadá. En este estudio se evaluó el efecto de diferentes sistemas de cultivo en la salud del suelo (propiedades físicas, químicas y biológicas, e indicadores de la salud del suelo) en la Estación de Investigación Agrícola de Lakehead [LUARS], en el norte de Ontario (Canadá). Se comparó tres sistemas de cultivo (cultivos perennes-pastos, pastizales y cultivos anuales - trigo, cebada, maíz y soya) y dos zonas forestales (plantación de coníferas y bosque mixto de regeneración natural) en LUARS. Se recogieron muestras de suelo a distintas profundidades y se analizaron diversos indicadores utilizando el marco de evaluación de la salud del suelo de Cornell. Los resultados mostraron que las puntuaciones de la salud del suelo variaban según los sistemas de cultivo. Los bosques naturales y los cultivos perennes-pastos tuvieron puntuaciones más altas en comparación con los cultivos anuales (trigo, cebada, maíz y soya). Se observó que la materia orgánica del suelo era más baja en los cultivos anuales (trigo, cebada, maíz y soya), mientras que la estabilidad de los agregados era más alta en los bosques naturales. El estudio también identificó la brecha de salud del suelo, misma que representa la diferencia entre la salud de un sistema de cultivo concreto y un punto de referencia. El análisis de la brecha de salud del suelo puede ayudar a los agricultores a aplicar prácticas para mejorar la salud del suelo y aumentar su resiliencia.

Palabras clave: sistema de cultivo anual, evaluación, materia orgánica, pasturas, salud del suelo, indicadores del suelo.

Abstract

Anthropogenic activities impact soil in varying degrees, from preserving natural landscapes to intensive agriculture which among the farm practices that impact the soil are the cropping systems. Information on cropping systems and soil impacts in northern territories is still missing. This study assesses the effect of different cropping systems on soil health -physical, chemical and biological soil properties and indicators of soil

SIEMBRA
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>
ISSN-e: 2477-8850
Periodicidad: semestral
vol. 11, núm 2, 2024
siembra.fag@uce.edu.ec
DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i2.6816>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

health - at the Lakehead Agricultural Research Station [LUARS] in northern Ontario, Canada. The study compares three cropping systems (perennial crops-pasture, grass, and annual crops -wheat, barley, corn, soybeans) and two forest areas (conifer plantation and naturally regenerating mixed wood forest) at LUARS. Soil samples were collected at different depths and analyzed for various indicators using the Cornell Soil Health Assessment framework. The results showed the soil health scores varied among cropping systems, with natural forest and perennial crops-pasture having higher scores compared to annual crops -wheat, barley, corn, soybeans. Soil organic matter was found to be lowest in annual crops -wheat, barley, corn, soybeans, while aggregate stability was highest in natural forests. The study also identifies the soil health gap, which represents the difference between the health of a particular cropping system and a benchmark. The soil health gap analysis can help farmers implement practices to improve soil health and increase the resilience and sustainability of agroecosystems. Overall, this study emphasizes the importance of understanding the effect of cropping systems on soil health and provides insights into potential strategies for improving farm practices.

Keywords: annual cropping system, assessment, organic matter, pasture, soil health, soil indicators.

1. Introducción

Las perturbaciones hacia el suelo causadas por los humanos van desde el mantenimiento de condiciones de pre-asentamiento (preservando los paisajes naturales) hasta la agricultura intensiva, consumiendo recursos a las expensas del medio ambiente (DeFries et al., 2004). La agricultura intensiva cambia las funciones del suelo como el balance de agua, materia orgánica y la entrada y salida de nutrientes. Los sistemas convencionales de monocultivo deterioran la estructura del suelo, incrementan la compactación y erosión del suelo, altera el ciclo del carbono orgánico y cambia el pH del suelo (Wei et al., 2014).

Varios indicadores de salud del suelo definen su nivel de degradación. Éstos incluyen propiedades físicas (capacidad de retención del agua, agregado de agua, penetración del suelo), propiedades químicas (contenidos de P, K, Mg, Fe, Mn, Zn extraíbles y C y N total), y propiedades biológicas (carbón activo, respiración del suelo, proteínas del suelo y materia orgánica), de acuerdo con la estructura de Cornell Assessment Soil Health [CASH] (Moebius-Clune et al., 2016). La salud del suelo “es la capacidad continua del suelo para funcionar como un sistema vital de vida, dentro del ecosistema y con límites de uso de tierra, y mantener la salud de plantas, animales y humanos” (Doran y Parkin, 1994). El objetivo principal de la evaluación es evaluar la salud del suelo como resultado de las perturbaciones antropogénicas como los sistemas de cultivo, rotaciones de cultivo, e intercalación de cultivos que se usan en la agricultura en diferentes escalas espaciales y temporales y que pueden ser monitoreadas (Yang et al., 2020).

Comparando los sistemas de cultivo es difícil debido a la variabilidad del suelo y las dinámicas temporales. Sin embargo, áreas experimentales de estudio pueden asistir en la comparación de diferentes áreas agrícolas (Karlen et al., 2019). Cualquier sistema de cultivo, incluido la rotación de cultivos, diversidad de plantas e intercalación de cultivos, es una adaptación para maximizar el rendimiento del cultivo, pero la intensificación de cualquiera de estas prácticas puede ser dañina para el medio ambiente. Consecuentemente, la evaluación de la salud del suelo puede ser usada para monitorear la sostenibilidad a largo plazo de un agroecosistema (Agomoh et al., 2020; Yang et al., 2020).

Por otro lado, la rotación de cultivos puede mejorar la estructura del suelo, reducir patógenos transmitidos por el suelo, facilitar la absorción de nutrientes, reducir insumos sintéticos y mejorar rendimientos. Además, la rotación de cultivos puede incrementar la materia orgánica, la biomasa de microorganismos y su actividad (Agomoh et al., 2020; Reicosky, 2018, p. 165). Adicionalmente, la diversidad de especies vegetales puede mejorar el microbiota del suelo, incrementando la eficiencia de nutrientes y manteniendo la estructura física del suelo. Esto también incrementa el rendimiento de los cultivos a través del balance de insumos químicos a diferentes escalas (Yang et al., 2020). También, la intercalación de cultivos mejora el control de plagas, incrementa el ciclo de nutrientes y mejora la conservación del agua y suelo (Tilman et al., 2002). Esto también mejora la funcionalidad de microorganismos y la eficiencia de absorción de nutrientes, reduciendo costos de fertilizantes y pesticidas (Sahota y Malhi, 2012), mejorando las funciones de la raíz de la planta y reduciendo la contaminación del suelo por químicos artificiales (Yang et al., 2020).

Los estudios son realizados para entender cómo el suelo se ha degradado a través del tiempo y para explorar el potencial de incrementar la salud del suelo. Como sabemos, la agricultura intensiva causa pérdidas de la función del suelo y determinar un parámetro de referencia de la salud del suelo comparando los sistemas de cultivo podría ayudar a definir objetivos para mejorar las prácticas en el campo. En general, las tierras que

no han sido perturbadas tienen indicadores de salud del suelo más altos que las áreas cultivadas y el espacio en medio de la salud de suelos no perturbados y suelos bajo un particular sistema de cultivo es definido como la brecha de la salud del suelo (Maharjan et al., 2020). El concepto de la brecha de la salud del suelo apoya la toma de decisiones para mejorar la salud del suelo y puede ser escalado a áreas regionales o nacionales (Maharjan et al., 2020).

Desde el 2003, la *Thunder Bay Agricultural Research Station* ha realizado estudios en la nutrición de plantas, nuevas variedades de cultivos, protección de cultivos y prácticas de manejo agrícola que han beneficiado a las comunidades agrícolas en el distrito de Thunder Bay. Sin embargo, no fue evaluado el cómo los sistemas de cultivo pueden afectar las funciones del suelo. El propósito de este estudio es evaluar la salud del suelo bajo diferentes sistemas de cultivo y determinar el punto de referencia del suelo relacionado a la materia orgánica en la Estación de *Lakehead Agricultural Research*.

2. Materiales y Métodos

El estudio fue realizado en la *Lakehead University Agricultural Research Station* [LUARS] en Thunder Bay, Ontario, Canadá, en el 2019. LUARS es parte del área del Río Slate, donde los suelos han sido influenciados por corrientes proglaciares y posterior deglaciación (Baldwin et al., 2000). La precipitación anual promedio es de 700-850 mm y la temperatura anual promedio de -26 °C a -22 °C en enero y de 21 °C a 25 °C en julio (Environment Canada, 1991).

En LUARS, tres sistemas de cultivo fueron elegidos (cultivos perennes-pastos, pastizales y cultivos anuales- trigo, cebada, maíz, soja) además dos áreas forestales de referencia (una plantación de coníferas y un bosque natural mixto adyacente de madera regenerado) (Figura 1). Las muestras de suelo fueron colectadas en julio 2019 usando un muestreador de núcleo dividido (AMS Soil Samplers, Inc., American Falls, Idaho). En cada área, se escogieron tres parcelas aleatorias y en cada esquina y al centro de cada parcela, cinco muestras fueron colectadas para formar una muestra compuesta a dos profundidades (superficial, 0-5 cm y más profunda, 5-15 cm). Las muestras de suelo fueron guardadas a temperaturas bajas para ser transportadas al Lakehead University Laboratory y enviadas al Cornell Soil Health Laboratory en Ithaca, New York. Los protocolos detallados y los procedimientos están disponibles para la estructura del CASH (Moebius-Clune et al., 2016). Estadísticas descriptivas y el diseño de parcelas divididas fueron usados para el estudio para comparar los indicadores de salud del suelo para los tres sistemas de cultivo y dos áreas forestales.

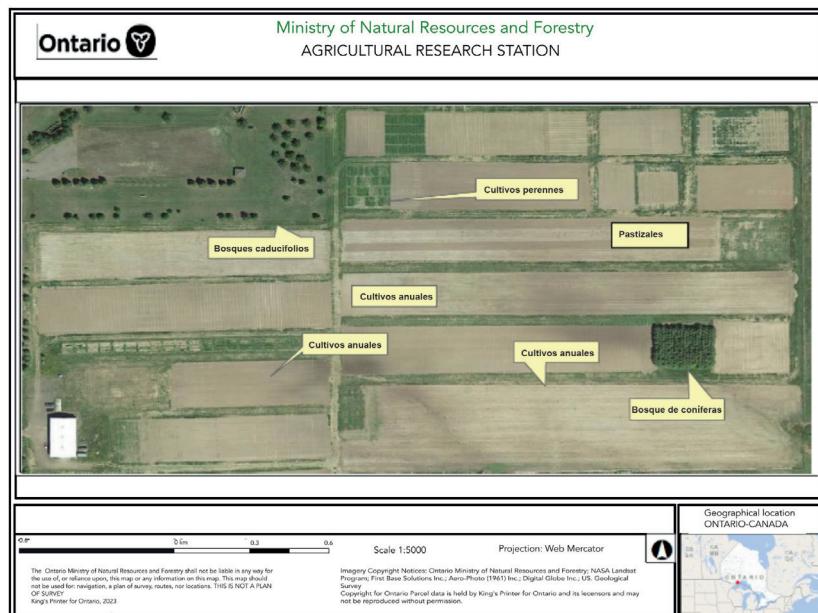


Figura 1. Evaluación del efecto de la perturbación en la salud del suelo, incluyendo sitios en triplicado de cultivos anuales (trigo, cebada, maíz, soja); cultivos perennes (pastizales), pastizales relativamente no perturbados, bosques deciduos y tratamientos de bosques de coníferas.

Figure 1. Assess the effect of disturbance on soil health, including triplicate sites of annual crops -wheat, barley, corn, soybeans; perennial crops-pasture, relatively undisturbed grass, deciduous forest, and conifer forest treatments.

3. Resultados y Discusiones

Los puntajes de la salud del suelo fueron altos y bajos en el siguiente orden: bosque natural < pastizal < bosque de coníferas < cultivos anuales – trigo, cebada, maíz, soya < cultivos perennes – pastos para las muestras de suelo poco profundo (Tabla 1). Para las muestras de suelo más profundas, el orden fue bosque natural < bosque de coníferas < cultivos anuales – trigo, cebada, maíz, soya < pastizales < cultivos perennes – pastos. Podemos esperar que los indicadores de la salud del suelo cambien para los sistemas de cultivo en diferentes estados de las plantas. Por ejemplo, SOM disminuye, luego incrementa, luego disminuye para los cultivos anuales – trigo, cebada, maíz, soya bajo un manejo intensivo, un efecto asociado con la práctica de arado (Congreves et al., 2015; Magdoff y Es, 2000; Magdoff y Weil, 2004), pero la ausencia de la perturbación del suelo en los cultivos perennes -pastos y bosques de coníferas sugieren un incremento solo en SOM de acuerdo con la estación de crecimiento (Magdoff y Es, 2000).

La estabilidad de los agregados del suelo fue alta para los bosques naturales y bajo para los cultivos anuales – trigo, cebada, maíz y soya para las muestras de suelo menos profundas y los pastizales tuvieron la menor estabilidad de agregados en las muestras de suelo más profundas. Bajos niveles de perturbación proveen la oportunidad para que los microorganismos creen micro agregados e incrementen la estabilidad del suelo (Das et al., 2014). Una baja compactación del suelo se espera en áreas con poca intervención de maquinaria (Afzalinia y Zabihi, 2014). Los suelos poco profundos fueron ácidos en la plantación de coníferas y pastos, pero suelos ácidos fueron encontrados en muestras más profundas solo en el bosque de coníferas. El pH bajo disminuye la tasa de inmovilización de NH_4^+ y la mineralización de N (Cheng et al., 2013). Bajo pH de 3.2 a 3.8 es asociado con los pinos (Oregon State University, 2017). Microelementos como Mn, Fe y Zn fueron variables en los sistemas de cultivos.

Los niveles de fertilización son idealmente directamente proporcionales al requerimiento del sistema de cultivo. Micronutrientes como Mn, Fe y Zn son requeridos por algunos sistemas de cultivos, pero raramente los síntomas de deficiencia son evidentes (Magdoff y Es, 2000). Fertilizantes de nitrógeno ayudan a los microorganismos a incrementar la materia orgánica del suelo [SOM], tasas de descomposición (Benalcazar et al., 2024; de Clercq et al., 2015) y hacer disponible al P para el uso de las plantas. Los hongos micorrízicos incrementan la absorción de P en suelos bajos en P. Sin embargo, altos niveles de N o P pueden dañar al medio ambiente (Carpenter et al., 1998; Magdoff, 2007; Torstensson et al., 2006). Más del 50% de fertilizantes pueden perderse en la atmósfera o a través de la percolación o filtración.

Indicadores biológicos, incluyendo SOM, fueron los más bajos para los cultivos anuales – trigo, cebada, maíz, soya en las muestras de suelo menos profundas. Para las muestras de suelo más profundas, los pastos, los cultivos perennes y anuales tuvieron niveles de SOM muy similares. Patrones similares ocurrieron para las proteínas del suelo, respiración del suelo y carbono activo, porque estos indicadores tienen una relación muy cercana con SOM. La materia orgánica del suelo es uno de los componentes más vitales que influencia a casi todos los indicadores mencionados e impacta un mayor número de funciones en el suelo como el manejo de pestes, capacidad de retención del agua y retención de nutrientes. Altos niveles de SOM mejora los agregados en el suelo, reduce la compactación y tiene un efecto benéfico en el microbiota del suelo (Lal, 2011; Magdoff y Es, 2000; Wiesmeier et al., 2019, Yang et al., 2024).

Los suelos del área de LUARS pueden ser descritos como si tuvieran dos niveles de brecha de salud del suelo. La primera corresponde a la recuperación de los sistemas de cultivos anuales hasta un punto de referencia donde el 24% de la mejora del SOM es requerida. La segunda brecha de la salud del suelo compara la plantación de coníferas con el sistema anual de cultivo y requiere que el 4% de SOM incremente, lo que puede ser un punto de referencia realista para la salud del suelo (Figura 2). Teniendo este tipo de análisis para el punto de referencia para la salud del suelo puede ayudar a los agricultores a implementar diferentes prácticas para incrementar la sostenibilidad y la resiliencia del agroecosistema. Los mejores ejemplos de prácticas de manejo que pueden ser implementados son la aplicación de diferentes residuos de cultivos o mantillo con niveles altos de materia orgánica. Plantar cultivos de cobertura para proteger de la erosión del viento y temperaturas extremas, minimizando las perturbaciones del suelo, mejora la estructura del suelo y el manejo de la fertilidad del suelo mantiene un pH óptimo para que la microflora y microfauna se beneficie del ecosistema del suelo (Acton y Gregorich, 1995; Doran y Parkin, 1994; Magdoff y Es, 2000).

Tabla 1. Efecto del Sistema de cultivo en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los indicadores de salud del suelo.**Table 1.** Effect of cropping systems on soil physical, chemical and biological soil health indicators.

		Profundidad del suelo								
		5 cm			15 cm					
		Bosque Natural	Bosques de Coníferas	Cultivos Perennes	Cultivos anuales	Bosques Naturales	Bosques de Coníferas	Pastizales	Cultivos perennes	Cultivos anuales
Estabilidad de agregados (%)	71.08	68.33	45.38	48.08	37.21	46.18	69.69	26.3	41.71	33.92
Dureza del subsuelo 30 cm (psi)	200	300	200	350	200	200	300	200	350	200
Dureza del suelo 15 cm (psi)	150	200	150	300	150	150	200	150	300	150
Indicador Físico	pH	6.31	5.47	5.87	6.45	6.18	6.36	5.58	6.13	6.76
	P (ppm)	7.39	7.29	8.89	10.56	16.92	2.84	4.05	2.89	2.66
	K (ppm)	220.61	239.35	236.23	184.35	373.18	170.44	163.07	138.36	82.88
	Mg (ppm)	1,551.15	771.74	608.5	882.58	787.11	1,140.32	818.51	799.49	888.27
	Mn (ppm)	10.39	13.50	8.33	3.54	10.92	6.59	10.87	4.77	2.26
	Fe (ppm)	8.71	14.69	14.68	5.78	8.47	24.80	16.82	18.04	6.89
	Zn (ppm)	3.11	1.12	2.60	0.94	1.00	1.43	0.88	1.43	0.16
	Materia Orgánica (%)	29.86	9.87	8.46	6.02	5.82	10.24	7.76	4.60	4.62
	Proteína del suelo	37.04	19.30	10.28	12.14	10.29	17.39	16.20	6.95	8.98
Indicadores Biológicos	Respiración del suelo	2.00	1.31	1.48	0.91	0.88	1.11	0.95	0.55	0.62
	Carbono activo (mg.mg ⁻¹)	4,266.98	1,360.55	1,051.84	1,038.17	1,064.22	1,402.47	1,157.94	749.41	887.81
	Puntaje Total	94,46	81.91	88.13	83.04	83.56	90.43	81.17	75.08	69.85
										78.60

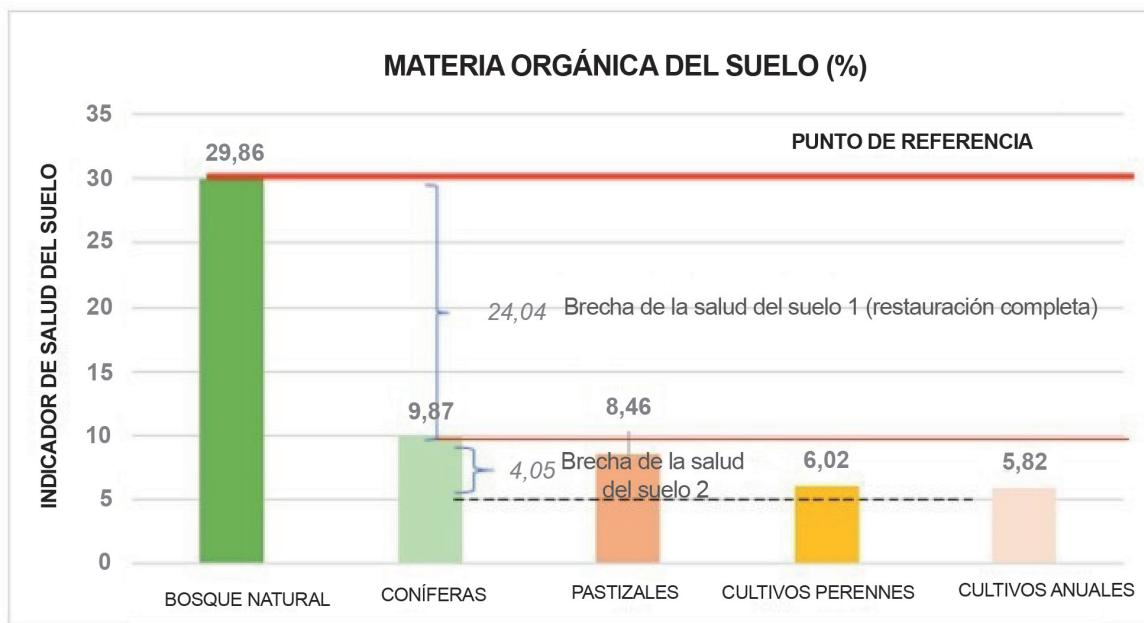


Figura 2. Sistemas de cultivo y medidas de referencia de materia orgánica del suelo para ilustrar la brecha en la salud del suelo y el potencial de mejorar el manejo agrícola (adaptado de Maharjan 2020).

Figure 2. Cropping Systems and benchmark measures of soil organic matter to Illustrate the soil health gap and the potential to improve farm management (adapted from Maharjan 2020).

4. Conclusiones

Los diferentes sistemas de cultivo tienen efectos variables en la salud del suelo en la *Lakehead University Agricultural Research Station* [LUARS]. Los puntajes de salud del suelo fueron más altos en los bosques naturales y los cultivos perennes (pastizales), mientras que los cultivos anuales - trigo, cebada, maíz, soja obtuvieron puntajes más bajos. La materia orgánica del suelo [SOM] fue más baja en los cultivos anuales - trigo, cebada, maíz, soja, lo que indica una posible degradación de la calidad del suelo. El estudio también identificó la brecha de salud del suelo, que representa la diferencia entre la salud de un sistema de cultivo específico y un punto de referencia. Este análisis puede ayudar a guiar a los agricultores en la implementación de prácticas para mejorar la salud del suelo y aumentar la resiliencia y sostenibilidad de los agroecosistemas. En general, este estudio resalta la importancia de considerar los indicadores de salud del suelo y aplicar prácticas de manejo adecuadas para mantener y mejorar la calidad del suelo en los sistemas agrícolas.

Agradecimientos

Agradecemos al *The Canadian Queen Elizabeth II Diamond Jubilee Advanced Scholars Program*, hecho posible gracias al apoyo financiero del *International Development Research Centre* y del *Social Sciences and Humanities Research Council*. Nuestro reconocimiento también al *Canadian Agricultural Police Institute*, *MITAC*, y a *Lakehead University Agricultural Research Station* (LUARS) por proporcionar los fondos para realizar esta investigación. Un agradecimiento especial a *Cornell Soil Health Laboratory*, a Robert Schindelbeck, Kirsten Kurtz y al equipo de Cornell por compartir su experiencia y conocimientos en salud del suelo. Finalmente, nuestro más sincero agradecimiento a todos los agricultores que nos permitieron acceder a sus tierras para llevar a cabo este estudio.

Financiamiento

The Canadian Queen Elizabeth II Diamond Jubilee Advanced Scholars Program, hecho posible gracias al apoyo financiero del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo y del Consejo de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades.

Contribuciones de los autores

- Paul Benalcazar: conceptualización, investigación, metodología, recursos, software, validación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

Acton, D. F., y Gregorich, L. J. (eds.). (1995). *The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada*. Agriculture and Agri-Food Canada. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.58906>

Afzalinia, S., y Zabihi, J. (2014). Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 137, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.11.003>

Agomoh, I. v., Drury, C. F., Phillips, L. A., Reynolds, W. D., y Yang, X. (2020). Increasing crop diversity in wheat rotations increases yields but decreases soil health. *Soil Science Society of America Journal*, 84(1), 170–181. <https://doi.org/10.1002/saj2.20000>

Baldwin, D. J., Desloges, J. R., y Band, L. E. (2000). Physical geography of Ontario. In A. H. Perera, D. L. Euler, & I. D. Thompson, *Ecology of a Managed Terrestrial Landscape: Patterns and Processes of Forest Landscapes in Ontario* (pp. 12-29). University of British Columbia Press. <https://www.ubcpress.ca/asset/12524/1/9780774807494.pdf>

Benalcazar, P., Seuradge, B., Diochon, A. C., Kolka, R. K., y Phillips, L. A. (2024). Conversion of boreal forests to agricultural systems: soil microbial responses along a land-conversion chronosequence. *Environmental Microbiome*, 19(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00576-3>

Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., y Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)

Cheng, Y., Wang, J., Mary, B., Zhang, J., Cai, Z., y Chang, S. X. (2013). Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 848–857. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.08.021>

Congreves, K. A., Hayes, A., Verhullen, E. A., y van Eerd, L. L. (2015). Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012>

Das, B., Chakraborty, D., Singh, V. K., Aggarwal, P., Singh, R., Dwivedi, B. S., y Mishra, R. P. (2014). Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice–wheat system. *Soil and Tillage Research*, 136, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.009>

de Clercq, T., Heiling, M., Dercon, G., Resch, C., Aigner, M., Mayer, L., Mao, Y., Elsen, A., Steier, P., Leifeld, J., y Merckx, R. (2015). Predicting soil organic matter stability in agricultural fields through carbon and nitrogen stable isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.011>

DeFries, R. S., Foley, J. A., y Asner, G. P. (2004). Land-use choices: Balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(5), 249–257. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0249:LCBHNA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0249:LCBHNA]2.0.CO;2)

Doran, J. W., y Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. En W. Doran, D. C. Coleman, D. F.

Bezdicek, y B. A. Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 1-21). SSSA Special Publications. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>

Environment Canada. (1991). *The state of Canada's environment*. Government of Canada. <https://publications.gc.ca/pub?id=9.881528&sl=0>

Karlen, D. L., Veum, K. S., Sudduth, K. A., Obrycki, J. F., y Nunes, M. R. (2019). Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*, 195, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>

Lal, R. (2011). Soil Health and Climate Change: An Overview. En B. P. Singh, A. L. Cowie, y K. Y. Chan (eds.), *Soil Health and Climate Change* (pp. 3-24). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20256-8_1

Magdoff, F. (2007). Ecological agriculture: Principles, practices, and constraints. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(2), 109-117. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001846>

Magdoff, F., y Es, H. van. (2000). *Building soils for better crops* (2^a ed.). Sustainable Agriculture Network. <https://soilwealth.com.au/wp-content/uploads/2023/08/030218bettersoils.pdf>

Magdoff, F., y Weil, R. R. (eds.). (2004). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780203496374>

Maharjan, B., Das, S., y Acharya, B. S. (2020). Soil Health Gap: A concept to establish a benchmark for soil health management. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01116. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01116>

Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Es, H. M. van, Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W., y Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework* (3.2 ed.). Cornell University. <http://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>

Oregon State University. (2017). *Small Farms Workshops*. College of Agricultural Sciences, Oregon State University. <https://agsci.oregonstate.edu/academics/available-projects/small-farms-workshops>

Reicosky, D. (ed.). (2018). *Managing soil health for sustainable agriculture Volume 1*. Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114530>

Sahota, T. S., y Malhi, S. S. (2012). Intercropping barley with pea for agronomic and economic considerations in northern Ontario. *Agricultural Sciences*, 03(07), 889-895. <https://doi.org/10.4236/as.2012.37107>

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

Torstensson, G., Aronsson, H., y Bergström, L. (2006). Nutrient use efficiencies and leaching of organic and conventional cropping systems in Sweden. *Agronomy Journal*, 98(3), 603-615. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0224>

Wei, X., Shao, M., Gale, W., y Li, L. (2014). Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*, 4(1), 4062. <https://doi.org/10.1038/srep04062>

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., y Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

Yang, Q., Peng, J., Ni, S., Zhang, C., Wang, J., y Cai, C. (2024). Soil erosion-induced decline in aggregate stability and soil organic carbon reduces aggregate-associated microbial diversity and multifunctionality of agricultural slope in the Mollisol region. *Land Degradation & Development*, 35(11), 3714-3726. <https://doi.org/10.1002/lrd.5163>

Yang, T., Siddique, K. H. M., y Liu, K. (2020). Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01118. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01118>