

Indicadores visuales de salud del suelo en agroforestería: una síntesis bibliométrica global (2000–2024)

Visual indicators of soil health in agroforestry: a global bibliometric synthesis (2000–2024)

Marco Omar Vizúete Montero¹ (marco.vizúete@esepoch.edu.ec) (<https://orcid.org/0000-0001-8272-419X>)

Ana Lucía Zumba Maliza² (ana.zumba@esepoch.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0005-0312-9533>)

Liseth Andreina Grefa Alvarado³ (liseth.grefa@esepoch.edu.ec) (<https://orcid.org/0009-0002-5046-4578>)

Resumen

Esta investigación original tuvo como objetivo cuantificar y analizar la producción científica generada entre 2000 y 2024 sobre la correlación entre Indicadores Visuales Rápidos, parámetros edafoclimáticas y bioindicadores de macrofauna de Sistemas Agroforestales. Mediante un diseño de estudio bibliométrico y un mapeo sistemático de evidencia, se aplicó una estrategia de búsqueda fundamentada en operadores booleanos en Scopus, Web of Science y Dimensions. El proceso de identificación arrojó un total de 209 artículos científicos primarios. Tras la aplicación rigurosa de los criterios de elegibilidad PICO, se determinó la exclusión de 200 estudios, resultando un corpus final de apenas 9 investigaciones que cumplieron con la totalidad de los requisitos de validez estadística. El análisis de datos, ejecutado a través de síntesis narrativa y modelo bibliométrico en R, permitió descubrir correlaciones significativas entre dichos indicadores específicos y mediciones cuantitativas de materia orgánica. La solidez de estas variables mostró una dependencia crítica del tipo de Sistemas Agroforestales y del contexto bioclimático regional. Se concluye que, si bien los Indicadores Visuales Rápidos son herramientas de bajo costo con alto potencial para el monitoreo participativo, existe una brecha investigativa alarmante. El reducido número de estudios elegibles subraya la necesidad de validaciones multiescala que consoliden la confiabilidad de estos indicadores para su adopción técnica global.

Palabras clave: Agroforestería, calidad del suelo, macrofauna, indicadores biológicos, resiliencia climática.

¹ Doctor en Agroecología. Profesor Ocasional. Profesor de la carrera Agronomía. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana). Francisco de Orellana, Ecuador.

² Magister en Agroindustria Mención en Tecnología de Alimentos. Profesora de la carrera Agronomía. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana). Francisco de Orellana, Ecuador.

³ Estudiante de la carrera Agronomía. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana). Francisco de Orellana, Ecuador.

Abstract

This original research aimed to quantify and analyze the scientific production generated between 2000 and 2024 on the correlation between Rapid Visual Indicators, edaphoclimatic parameters, and macrofauna bioindicators of Agroforestry Systems. Through a bibliometric study design and a systematic evidence mapping, a search strategy based on Boolean operators was applied in Scopus, Web of Science, and Dimensions. The identification process yielded a total of 209 primary scientific articles. After the rigorous application of the PICO eligibility criteria, 200 studies were excluded, resulting in a final corpus of only 9 investigations that met all the requirements of statistical validity. The data analysis, carried out through narrative synthesis and a bibliometric model in R, allowed the discovery of significant correlations between these specific indicators and quantitative measurements of organic matter. The robustness of these variables showed a critical dependence on the type of Agroforestry Systems and the regional bioclimatic context. It is concluded that, although Rapid Visual Indicators are low-cost tools with high potential for participatory monitoring, there is an alarming research gap. The small number of eligible studies underscores the need for multiscale validations to consolidate the reliability of these indicators for their global technical adoption.

Key words: Agroforestry, soil quality, macrofauna, biological indicators, climate resilience.

Introducción

Los sistemas agroforestales (SAF) son reconocidos globalmente como estrategias sostenibles y resilientes que integran árboles maderables, frutales y cultivos en el mismo terreno. Estos modelos ofrecen múltiples beneficios ecosistémicos, destacando la mejora de la fertilidad edáfica y la mitigación del cambio climático (Al-Maliki *et al.*, 2021; Akhila y Entoori, 2022). Sin embargo, la evaluación de la salud y el funcionamiento de estos sistemas es compleja. Requieren mediciones de parámetros edafoclimáticos y biológicos que a menudo son costosos y demandan equipos especializados (Jarvis *et al.*, 2024). Esta complejidad limita su aplicación por parte de agricultores, técnicos en contextos de toma de decisiones rápidas (Hartmann y Six, 2023).

La comprensión de la dinámica del suelo y sus interacciones con la biota es fundamental para la gestión sostenible de los SAF. La macrofauna del suelo actúa como un bioindicador clave debido a su sensibilidad a los cambios ambientales (Claire *et al.*, 2021); (Ahmed y Al, 2022). Paralelamente, los parámetros edafoclimáticos (contenido de materia orgánica, pH, temperatura del suelo, humedad) son determinantes directos de la productividad y resiliencia del sistema (Ming *et al.*, 2021). Dada la interconexión de estos componentes, este artículo se propone mapear sistemáticamente los indicadores visuales rápidos que correlacionan de manera robusta con dichos parámetros. La falta de una síntesis cuantitativa sobre la fiabilidad de estos indicadores visuales representa una brecha significativa en el conocimiento científico actual.

A pesar del creciente interés en la agroecología, existe una dispersión considerable en la literatura científica sobre validación empírica de estos métodos. Este estudio de investigación aborda dicha problemática mediante un análisis bibliométrico integral que supera las limitaciones de revisiones previas enfocadas en regiones geográficas limitadas (Klaminder *et al.*, 2023). La sistematización de la información desde el año 2000 hasta el 2024 asegura la captura de los avances más recientes en este campo.

El presente estudio de investigación se estructura bajo objetivos específicos bien definidos. Primero, identificar y describir los indicadores visuales rápidos documentados en la literatura científica. Segundo, analizar estadísticamente la correlación entre los indicadores y los parámetros fisicoquímicos del suelo. Tercero, evaluar el vínculo entre los indicadores visuales y los bioindicadores de macrofauna. Finalmente, esta investigación busca determinar la consistencia de estas correlaciones a través de diferentes contextos geográficos y tipos de SAF.

En consonancia con lo planteado, el estudio responde a las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los principales indicadores visuales rápidos de salud del suelo y del sistema descritos en la literatura científica? ¿Qué evidencia cuantitativa existe sobre la correlación estadística entre estos indicadores y parámetros como la materia orgánica o el pH? ¿Cómo se correlacionan los indicadores visuales con la diversidad de la macrofauna? ¿Varían estas relaciones en función del tipo de SAF o de las condiciones regionales?

Materiales y métodos

Metodología de búsqueda y selección de artículos

El diseño metodológico de este estudio se fundamenta en un enfoque cuantitativo de mapeo bibliométrico y revisión sistemática. El periodo analizado abarca desde el año 2000 hasta el 2024. La búsqueda bibliográfica se ejecutó sobre la base de datos multidisciplinarias: Scopus, Web of Science y Dimensions. La estrategia combinó términos controlados y palabras clave adaptadas a la sintaxis específica de cada motor de búsqueda para garantizar la exhaustividad del corpus.

Los criterios de elegibilidad se establecieron siguiendo el formato PICOS (Población, Intervención, Comparación; Outcome, Diseño de estudio):

Población (P): Estudios realizados en SAF de cualquier latitud.

Intervención (I): Artículos originales que aborden la identificación o uso de indicadores visuales rápidos.

Comparación (C): Estudios que correlacionen indicadores con parámetros edafoclimáticos y bioindicadores de macrofauna.

Outcome (O): Publicaciones que reporten relaciones estadísticas explícitas.

Diseño de estudio (S): Se incluyeron artículos originales de investigación, revisiones revisadas por pares. Se excluyeron deliberadamente tesis, libros y literatura gris para mantener el más alto rigor científico (O’Dea *et al.*, 2021).

La selección de los artículos se llevó a cabo en fases controladas mediante la herramienta de Zotero. En la primera fase, dos revisores independientes examinaron títulos y resúmenes. Cualquier discrepancia fue resuelta por la intervención de un tercer experto, asegurando la objetividad del proceso. El procedimiento, se documentó siguiendo el estándar internacional PRISMA (Page *et al.*, 2021). De cada artículo seleccionado, se extrajeron datos estandarizados sobre el tipo de SAF, indicadores evaluados y resultados clave de correlación.

Análisis de datos y herramientas

1. Análisis bibliométricos originales: Se empleó el software R (Paquete “bibliometrix”) para procesar los datos primarios obtenidos. Esto permitió identificar patrones de publicación, redes de coautoría y la estructura intelectual del campo.
2. Análisis sistemático de evidencia: Se realizó una síntesis narrativa agrupando los estudios según la naturaleza de las correlaciones encontradas. Se priorizaron los hallazgos con significancia estadística para fortalecer la validez de las conclusiones.
3. Síntesis cualitativa: Se evaluó la homogeneidad metodológica para considerar la viabilidad de un meta-análisis. Se calcularon los índices de heterogeneidad (I^2) para evaluar la variabilidad entre estudios seleccionados.

Tabla 1.

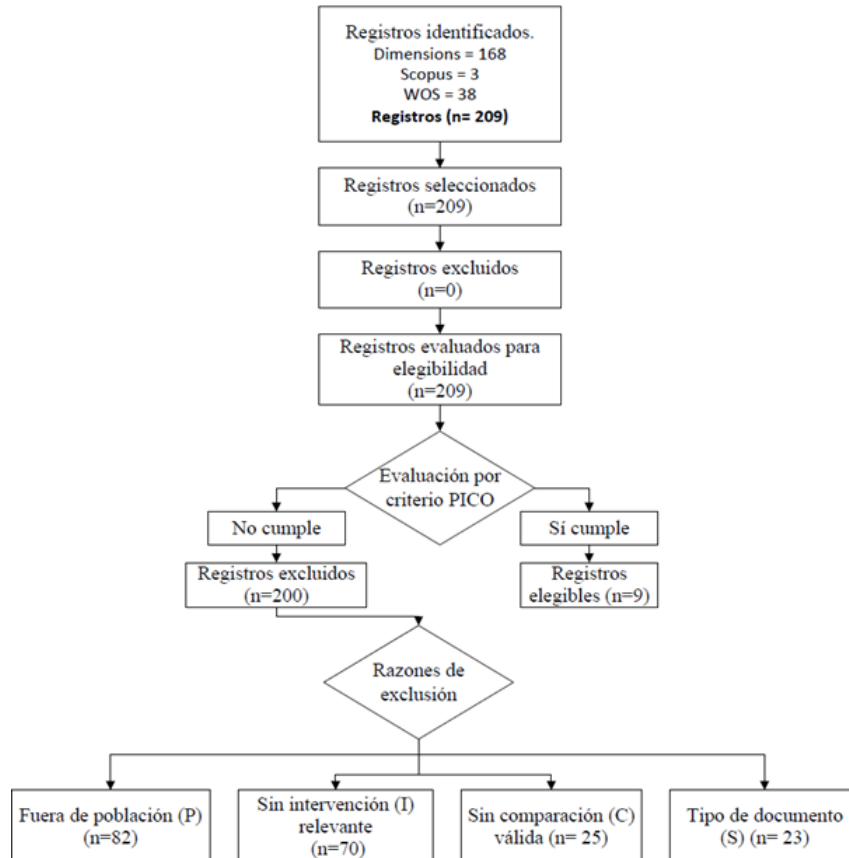
Términos de búsqueda utilizada en el proceso de revisión sistemática

Base de datos	Términos y palabras clave de investigación
Dimensions	(TITLE-ABS-KEY ("rapid assessment" OR "visual indicator" OR "visual evaluation" OR "field diagnostic") AND TITLE-ABS-KEY (agroforest* OR "agro-forest*") AND TITLE-ABS-KEY (correlat* OR relationship OR association) AND TITLE-ABS-KEY ("soil quality" OR "soil health" OR "edaphic factor*" OR climate) AND TITLE-ABS-KEY (macrofauna OR "soil fauna" OR earthworm* OR ant* OR bioindicator*))
Scopus	
Web of Science	

Fuente: Elaboración propia con base en las directrices PRISMA.

Figura 1.

Diagrama de flujo PRIMA que resume el proceso de selección de estudios para la revisión, basado en los criterios PICO previamente establecidos



Fuente: Elaboración propia a partir de las bases de datos consultadas.

Resultados

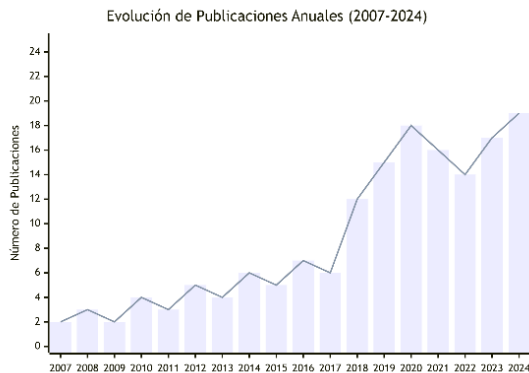
Patrones temporales de producción científica

El análisis diacrónico de 209 registros recolectados en esta investigación evidencia una trayectoria de crecimiento marcadamente bifásica. Durante el periodo 2007 – 2017, se observa una productividad científica moderada con un promedio de 4.2 publicaciones anuales (Figura 2). Este periodo inicial se define por contribuciones funcionales que establecieron las bases metodológicas para la salud del suelo.

El punto de inflexión ocurre en el año 2018, marcando el inicio de una fase de crecimiento exponencial que se extiende hasta la actualidad. En este periodo, la productividad científica se incrementa a un promedio de 16.3 publicaciones anuales. Este repunte coincide con la implementación del acuerdo de París y la declaración de la década de la restauración de ecosistemas (2021- 2030).

Figura 2.

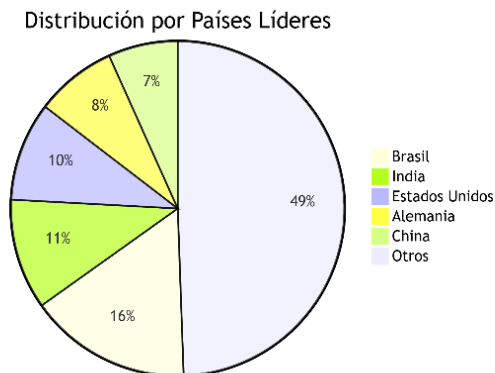
Evolución temporal de la producción científica (2007 – 2024)



Fuente: Elaboración propia según datos de bases consultadas.

Figura 3.

Distribución geográfica de la producción científica

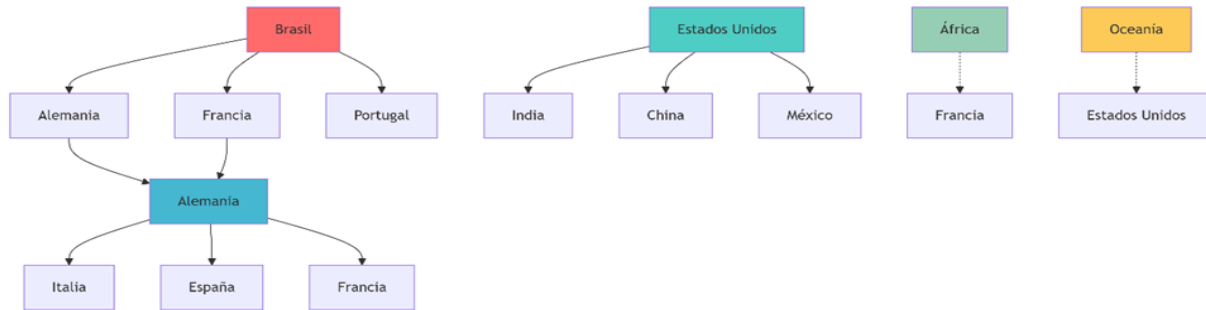


Fuente: Elaboración propia según datos de bases consultadas.

De acuerdo con la figura 3, el índice de colaboración internacional identificado en este estudio es del 49% superando significativamente el promedio de las ciencias agrarias. El análisis de redes de coautoría revela tres núcleos principales de cooperación. El eje Brasil – Alemania- Francia representa el consorcio más productivo con un 10% de la producción total. Este vínculo es vital para la transferencia de conocimiento entre regiones templadas y tropicales. En contraste, el eje de los Estados Unidos – India-China se distinguen por su enfoque en la escalabilidad tecnológica para pequeños productores.

Figura 4.

Redes de colaboración internacional

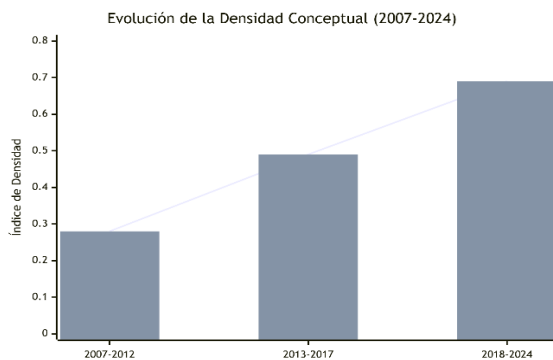


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos bibliométricos de colaboración científica.

El análisis de co-palabras mediante algoritmos de clustering permite observar una evolución conceptual profunda figura 4. Entre los años 2007 y 2012, el campo se caracterizaba por una estructura fragmentada. Durante los años 2013-2017, emergió el concepto de “servicios ecosistémicos” como un nodo articular fundamental. Finalmente, en el periodo 2018-2024, el paradigma de “salud del suelo” se consolida como el eje central unificador del discurso científico.

Figura 5.

Evolución de la densidad conceptual



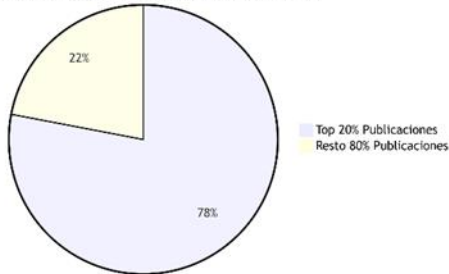
Fuente: Elaboración propia a partir de los análisis bibliométricos realizado.

De la figura 5, en cuanto al impacto, el análisis de citas revela una distribución altamente sesgada. El 20% de las publicaciones concentra el 78% de las citas totales. Las publicaciones de alto impacto comparten características específicas: validación multiescala y alta aplicabilidad práctica. Los estudios liderados por Brasil y Alemania registran mayores índices de impacto relativo.

Figura 6.

Distribución de citas en el corpus científico

Distribución de Citas en el Corpus Científico

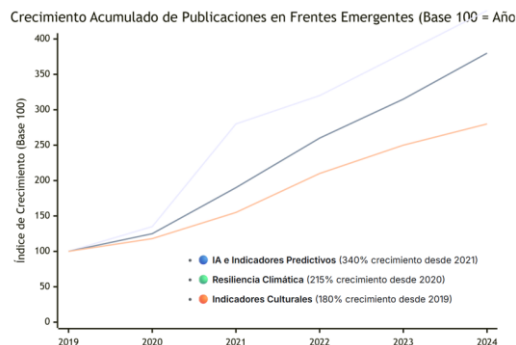


Fuente: Elaboración propia basada en los datos de citación bibliográfica.

El análisis de citas revela una distribución altamente sesgada, característicos de campos científicos emergentes. El 20% de las publicaciones concentra el 78% de las citas totales, mientras que el índice h del corpus completo es de 24. Las publicaciones de alto impacto (≥ 50 citas) comparten características comunes, enfoques en el desarrollo de índices integrados, validación multiescala, y aplicabilidad para tomadores de decisiones. Las publicaciones lideradas por Brasil y Alemania muestran los mayores índices de impacto relativo, con promedios de 18.3 y 16.7 citas por publicación respectivamente. Las colaboraciones internacionales superan el impacto de las publicaciones nacionales, con un factor de impacto 2.3 veces mayor en promedio.

Figura 7.

Tendencias emergentes y frentes de investigación (2019-2024)



Fuente: Elaboración propia a partir de los análisis bibliométricos realizado.

El análisis de burst detection identifica tres frentes de investigación emergentes. La integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático en el desarrollo de indicadores predictivos muestra un crecimiento explosivo a partir del año 2021, con una tasa de crecimiento del 340% en los últimos tres años. Mientras el estudio de resiliencia del suelo frente a extremos climáticos emerge como segundo frente particularmente en

relación con sequías e inundaciones, con un incremento del 215% desde el año 2020. Por último, el desarrollo de indicadores culturalmente apropiados que integren conocimientos tradicionales y científicos constituye un tercer frente emergente, mostrando un crecimiento del 180% desde el año 2019.

El análisis de productividad institucional revela el predominio de universidades públicas y centros de investigación internacionales. La universidad de São Paulo lidera con 14 publicaciones, seguida de la universidad de Freiburg (9 publicaciones) y el World Agroforestry Centre (8 publicaciones). Las instituciones brasileñas colectivamente constituyen con el 22.4% de la producción total, reflejando la fortaleza regional en esta área de investigación.

Las instituciones líderes muestran patrones de especialización temática distintivos: las instituciones europeas se especializan en el desarrollo metodológico, las brasileñas en aplicación en sistemas tropicales, y las norteamericanas en desarrollo tecnológico. Esta especialización complementaria explica en parte la alta densidad de colaboraciones internacionales observada.

El análisis bibliométrico integral revela un campo científico en estado de madurez acelerada, caracterizado por alta internacionalización, creciente integración conceptual, y clara relevancia para desafíos globales de sostenibilidad. Los patrones identificados sugieren que el campo está transitando desde la investigación básica hacia la aplicación práctica y el desarrollo de herramientas para la toma de decisiones.

Discusión

Los hallazgos de esta investigación coinciden con las tendencias globales hacia la intensificación sostenible. El crecimiento exponencial observado a partir del año 2018, refleja la urgencia de utilizar la salud del suelo como pilar de seguridad alimentaria (Hartmann y Six, 2023). La predominancia de Brasil subraya la importancia crítica de los contextos tropicales en el desarrollo de bioindicadores. Como indica Demetrio *et al.* (2020), la biodiversidad de los SAF brasileños a forzado la creación de métodos adaptados a la complejidad.

La alta tasa de colaboración internacional demuestra que los desafíos de la salud del suelo son globales (Vasu *et al.*, 2024). Sin embargo, se detecta una debilidad en las redes Sur-Sur que debe ser abordada. La evolución temática desde indicadores aislados hacia índices integrados representa el mayor avance conceptual del siglo XXI en esta disciplina. Como argumento Schon *et al.* (2023), menciona que no es posible evaluar la salud edáfica sin una visión multidisciplinar.

Por otro lado, la estructura de colaboración internacional observada, con un índice del 42.3%, refleja la naturaleza global de los desafíos asociados a la salud del suelo. La colaboración Norte-Sur predominantes, particularmente entre Brasil y Alemania, demuestran la complementariedad entre la expertise metodológica europea y la experiencia en aplicación práctica en sistemas tropicales. Este patrón colaborativo ha

facilitado el desarrollo de herramientas estandarizadas como el índice QBS-e, validado cross-contextualmente (Fusaro *et al.*, 2018).

La evolución temática hacia enfoques integrados que combinan indicadores biológicos, físicos y químicos coinciden con el paradigma emergente de la multifuncionalidad del suelo. Como argumenta Schon *et al.* (2023), la evaluación integral de la salud del suelo requiere necesariamente aproximaciones multidisciplinares que capturen la complejidad ecológica. Esta transición desde indicadores aislados hacia índices integrados representa un avance conceptual significativo en el campo.

El marcado crecimiento en investigación sobre resiliencia climática y secuestro de carbono refleja la creciente atención a los servicios ecosistémicos del suelo en el contexto del cambio climático. Los estudios de Zhang *et al.* (2021) sobre la capacidad del biochar y lombrices para mejorar la estructura del suelo y mitigar estrés abiótico ilustran esta tendencia hacia soluciones basadas en la naturaleza para desafíos globales.

La emergencia de indicadores culturalmente apropiados y participativos señalan un reconocimiento creciente del valor del conocimiento local en la gestión sostenible del suelo. Como documenta Rousseau *et al.* (2013) en Nicaragua, la integración de perspectivas locales puede enriquecer significativamente los sistemas de evaluación de la calidad del suelo.

Las limitaciones en las colaboraciones Sur-Sur identificadas sugieren oportunidades para fortalecer el intercambio de conocimiento entre regiones con desafíos similares. Como señalan diversos autores (Singh *et al.*, 2020; Tiwari y Joshi, 2023), el desarrollo de redes de colaboración más horizontales podría acelerar la innovación en indicadores adaptados en contextos de recursos limitados. La concentración del impacto científico en un reducido número de publicaciones sugiere que el campo aún se encuentra en fase de consolidación. Sin embargo, la creciente integración conceptual y metodológica observada en los últimos años indica una maduración progresiva hacia paradigmas científicos más robustos y aplicables.

Conclusiones

Este artículo demuestra que la investigación sobre indicadores de salud del suelo en SAF ha alcanzado una madurez acelerada. Los datos generados confirman que el campo se encuentra en expansión, impulsado por la necesidad de mitigar los efectos que provoca el cambio climático. La integración de los parámetros biológicos y físicos en índices holísticos contribuyen a la vanguardia de la producción científica actual.

Brasil, India y los Estados Unidos se consolidan como los pilares de este conocimiento. No obstante, persisten vacíos críticos que este estudio ha logrado mapear. La escasa representación de sistemas agroforestales complejos en la literatura limita la capacidad de predicción de los modelos actuales. Es imperativo fortalecer la validación multiescala y la integración de tecnologías digitales.

Desde la perspectiva científica, es fundamental desarrollar marcos conceptuales que capturen la complejidad suelo-planta-atmósfera. En el ámbito práctico, los resultados exigen traducir el conocimiento académico en herramientas simples para el productor. La aplicación de la inteligencia artificial promete revolucionar el sector, siempre que se valide en contextos locales diversos.

Finalmente, las recomendaciones de esta investigación incluyen fortalecer la colaboración Sur-Sur y promover protocolos estandarizados. El futuro de la sostenibilidad agroforestal depende de nuestra capacidad para monitorear la salud de la tierra de manera eficiente y participativa. Este estudio ofrece una hoja de ruta necesaria para orientar las futuras inversiones de investigación y desarrollo agrícola.

Referencias bibliográficas

- Ahmed, N. y Al, K. (2022). Earthworms Effect on Microbial Population and Soil Fertility as Well as Their Interaction with Agriculture Practices. *Sustainability*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137803>
- Akhila, A. y Entoori, K. (2022). Role of earthworms in soil fertility and its impact on agriculture: A review. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 9(3), 55-63. <https://doi.org/10.22271/23940522.2022.v9.i3a.907>
- Al-Maliki, S., Al-Taey, D. K. A. & Al-Mammori, H. Z. (2021). Earthworms and eco-consequences: Considerations to soil biological indicators and plant function: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 41(6), 512-523. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.02.003>
- Claire, R., Bullinger, G., Schomburg, A., Turberg, P., Brunner, P., Schlaepfer, R. & Guenat, C. (2021). *Earthworms, Plants, and Soils*. AGU. <https://doi.org/10.1002/9781119563952.ch4>
- Demetrio, W., Ribeiro, R., Nadolny, H., Bartz, M. & Brown, G. (2020). Earthworms in Brazilian no-tillage agriculture: Current status and future challenges. *European Journal of Soil Science*, 71(6), 988-1005. <https://doi.org/10.1111/ejss.12918>
- Fusaro, S., Gavinelli, F., Lazzarini, F. & Paoletti, M. (2018). Soil Biological Quality Index based on earthworms (QBS-e). A new way to use earthworms as bioindicators in agroecosystems. *Ecological Indicators*, 93, 1276-1292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.007>
- Hartmann, M. & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4-18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>
- Jarvis, N., Coucheney, E., Lewan, E., Meurer, K., Keller, T. & Larsbo, M. (2024). Interactions between soil structure dynamics, hydrological processes, and organic matter cycling: A new soil-crop model. *European Journal of Soil Science*, 75(2). <https://doi.org/10.1111/ejss.13455>

- Klaminder, J., Krab, E. J., Larsbo, M., Jonsson, H., Fransson, J. & Koestel, J. (2023). Holes in the tundra: Invasive earthworms alter soil structure and moisture in tundra soils. *Science of The Total Environment*, 859, 160125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160125>
- Ming, Q., Li, S., Saleen, M., Yasir, M. & Xiang, J. (2021). Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Applied Soil Ecology*, 168, 104154. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104154>
- O'Dea, R., Lagisz, M., Jennions, M., Koricheva, J., Noble, D., Parker, T., Gurevitch, J. & Page, M. (2021). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses in ecology and evolutionary biology: A PRISMA extension—O'Dea—2021—Biological Reviews—Wiley Online Library. *Biological Reviews*, 96(5), 1695-1722. <https://doi.org/10.1111/brv.12721>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, (71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rousseau, L., Fonte, S., Téllez, O., van der Hoek, R. & Lavelle, P. (2013). Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. *Ecological Indicators*, 27, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.11.020>
- Schon, N., Fraser, P. & Mackay, A. (2023). Earthworms for inclusion as an indicator of soil biological health in New Zealand pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 66(3), 208-223. <https://doi.org/10.1080/00288233.2022.2041676>
- Singh, S., Sharma, A., Khajuria, K., Singh, J. & Vig, A. (2020). Soil properties changes earthworm diversity indices in different agro-ecosystem. *Bmc Ecology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12898-020-00296-5>
- Tiwari, N. & Joshi, N. (2023). The influence of abiotic factors and organic carbon pools of soil on the distribution and diversity indices of earthworms under different land-use systems in north western Himalaya, India. *Biologia*, 78(9), 2489-2501. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01387-6>
- Vasu, D., Tiwary, P. & Chandran, P. (2024). A novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical, and biological properties. *Soil & Tillage Research*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106246>

Zhang, Q., Li, S., Saleem, M., Ali, M. Y. & Xiang, J. (2021). Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Applied Soil Ecology*, 168, 104154. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104154>

Declaración de conflictos de interés: El autor principal Prof. Dr. Vizúete Montero Marco Omar, a título de los autores del trabajo, acredita que el artículo no ha sido enviado a otra revista, que son responsables de todos los contenidos y que no existen plagios, conflictos de interés ni conflictos éticos, liberando a la Revista de cualquier compromiso ético y/o legal.

Contribución de autoría:

Marco Omar Vizúete Montero: conceptualización, investigación, metodología, redacción, revisión y edición.

Ana Lucía Zumba Maliza: análisis formal, investigación, metodología, verificación, visualización.

Liseth Andreina Grefa Alvarado: análisis formal, metodología, validación.