



## Genes de Microorganismos Utilizados como Biomarcadores para Detectar la Salud del Suelo Genes From Microorganisms Used as Biomarkers to Detect Soil Health

Jonathan Noé Rubio-Valdez<sup>1</sup> , Jorge Armando Chávez-Simental<sup>2</sup> ,  
Ixchel Abby Ortiz-Sánchez<sup>3</sup> , Carlos Antonio Alba-Fierro<sup>4</sup>  y  
Juan Pablo Cabral-Miramontes<sup>4†</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango, Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales; (J.N.R.V.). <sup>2</sup>Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera; (J.A.Ch.S.). Blvd. Guadiana 501 Fracc. Ciudad Universitaria. 34113 Durango, Durango, México.

<sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Carr. Durango-México km 23.5. 34371 Villa Montemorelos, Durango, Durango, México; (I.A.O.S.).

<sup>4</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Químicas (Unidad Durango). Av. Veterinaria s/n, Colonia Valle del Sur. 34120 Durango 34120, México; (C.A.A.F.), (J.P.C.M.).

† Autor para correspondencia: juan.cabral@ujed.mx

### RESUMEN

La salud del suelo es esencial para la estabilidad ecosistémica, biodiversidad y seguridad alimentaria. La degradación y contaminación del suelo afectan su fertilidad, por lo que es necesario el continuo monitoreo de indicadores fisicoquímicos y biológicos con finalidad de aspirar a una agricultura sostenible. A través de los biosensores es posible detectar analitos en suelo y agua, proporcionando alertas rápidas y complementando métodos analíticos convencionales. Estos biosensores, que incluyen tejidos, cultivos de microorganismos, enzimas y anticuerpos, son útiles en el sector ambiental, seguridad alimentaria y medicina para detectar diversos analitos. Para esto, se recomienda utilizar genes reporteros que están presentes de forma endógena en un organismo, los cuales se utilizan para detectar compuestos en condiciones específicas y son ampliamente utilizados por su precisión y exacta cuantificación de concentraciones de contaminantes. Este artículo de revisión presenta compilación de información global actualizada con el objetivo de reunir información más relevante sobre los aspectos que afectan al suelo y limitan su potencial productivo; asimismo, pretende proyectar amplio panorama de la importancia y alternativas que se han generado en diversas investigaciones para detectar la salud del suelo que permitan tomar decisiones de manera oportuna para su tratamiento inmediato.



#### Cita recomendada:

Rubio-Valdez, J. N., Chávez-Simental, J. A., Ortiz-Sánchez, I. A., Alba-Fierro, C. A., & Cabral-Miramontes, J. P. (2025). Genes de Microorganismos Utilizados como Biomarcadores para Detectar la Salud del Suelo. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. e2301. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2301>

Recibido: 20 de mayo de 2025.

Aceptado: 25 de septiembre de 2025.

Revisión. Volumen 43.

Diciembre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Esteban Sánchez-Chávez

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2025 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/>).

**Palabras clave:** biosensores, contaminantes, degradación edáfica, sistemas reporteros.

### SUMMARY

Soil health is essential for ecosystem stability, biodiversity, and food security. Soil degradation and contamination adversely affect soil fertility; therefore, continuous monitoring of physicochemical and biological indicators is required to support sustainable agricultural systems. Biosensors enable the detection of analytes in soil and water, providing rapid alerts and complementing conventional analytical methods. These biosensors, which may include tissues, microbial cultures, enzymes, and antibodies, are widely applied in environmental monitoring, food safety, and medical fields for the detection of a broad range of analytes. In this context, the use of reporter genes endogenously present in organisms is recommended, as they allow the detection of compounds under specific conditions and are extensively used due

to their precision and accurate quantification of contaminant concentrations. This review article compiles updated global information with the objective of synthesizing the most relevant factors affecting soil functionality and limiting its productive potential; additionally, it aims to provide a comprehensive overview of the importance of, and alternatives developed in, various studies for assessing soil health, thereby supporting timely decision-making for its immediate management.

**Index words:** biosensors, contaminants, edaphic degradation, reporter systems.

## INTRODUCCIÓN

La salud del suelo se define como capacidad para mantener estabilidad ambiental, lo que incluye retención de agua y aire, favoreciendo así el crecimiento de plantas y continuidad de los ecosistemas animales. Los suelos, como ecosistemas complejos y ricos en biodiversidad, albergan 25% de las especies que habitan nuestro planeta (Zheng *et al.*, 2024). En este contexto, garantizar seguridad alimentaria frente al aumento de la población mundial, junto con la expansión de la industrialización y creciente demanda de alimentos, plantea retos significativos. Entre estos desafíos, destaca la necesidad de priorizar la sostenibilidad ambiental y conservación de la biodiversidad, tareas que recaen sobre los gobiernos, investigadores y el sector productor de alimentos (Sharma, Walia, Dhaliwal, Saini y Bhagat, 2023).

Para describir el suelo es necesario determinar las propiedades que se definen por tres parámetros específicos: Indicadores Físicos, Indicadores Químicos e Indicadores Biológicos. Los indicadores Físicos son textura del suelo, densidad aparente, estabilidad de agregados, porosidad, compactación e infiltración, los cuales contribuyen a la estructura y retención de agua del suelo. Por otro lado, los factores químicos son capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), pH del suelo, conductividad eléctrica, cantidad de macro y microelementos, como nitrógeno, fósforo y azufre, los cuales definen en gran medida la fertilidad del suelo (Blanco-Canqui, Ruis, y Francis, 2024). Finalmente, los Factores Biológicos son contenido de materia orgánica, relación Nitrógeno - Carbono y tasa de descomposición (Ghosh *et al.*, 2020).

La pérdida de fertilidad y degradación del suelo son fenómenos complejos y continuos, además, existen agentes externos que alteran la salud del suelo y ponen en riesgo la interacción de organismos vivos sobre la tierra; alrededor de un tercio del suelo del planeta está catalogado con degradación moderada y alta (Mikhailova *et al.*, 2024). Los metales y metaloides son ejemplos de agentes externos y son elementos inorgánicos que tienen densidades atómicas superiores a la del agua ( $H_2O$ ) (Pourret y Hursthouse 2019). Algunos de estos elementos son potencialmente tóxicos para los suelos agrícolas, así como para plantas; los metales que contaminan con frecuencia incluyen: cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr), arsénico (As), mercurio (Hg), níquel (Ni), cobre (Cu) y zinc (Zn) (Ghori *et al.*, 2019). Además, la excesiva demanda de alimentos incentiva la búsqueda de sitios para el desarrollo agroindustrial, que basa sus prácticas en el uso de compuestos químicos (plaguicidas), los cuales tienen como consecuencia su acumulación en agua y suelo a corto y largo plazo (Postigo *et al.*, 2021).

Un biosensor es una herramienta analítica basada en biotecnología, diseñada para detectar contaminantes. Está compuesto por elementos transductores de señales, capaces de generar respuestas detectables o cuantificables al identificar sustancias nocivas (Voon, Yusop y Khor, 2022). Hay diversos tipos de biosensores, como los que emplean células libres o células completas. Estos se clasifican en específicos o no específicos, dependiendo de los elementos biológicos utilizados y de su capacidad de detección. Por ejemplo, los biosensores basados en células libres y los que emplean células completas pueden proporcionar datos sobre la biodisponibilidad y los efectos tóxicos de los contaminantes (Kaur, Kumar, Babu y Mittal, 2015).

Aunque los biosensores no están diseñados para sustituir por completo los métodos analíticos tradicionales, ofrecen una ventaja clave: su capacidad para alertar rápidamente al usuario final sobre toxicidades generales o específicas que puedan afectar al suelo y agua. Esto permite tomar medidas correctivas oportunas, incluso antes de realizar análisis convencionales para confirmar los resultados (Brutesco *et al.*, 2017).

Un gen reportero está presente de forma natural en un organismo, son inducidos por sustancias específicas para expresar respuesta biológica que después es convertida en señal fisicoquímica para su detección y así ser usado como biosensor. En las últimas décadas se han empleado para detectar la presencia de compuestos o condiciones específicas. Estos genes se seleccionan por sus características que facilitan su identificación y medición. Los biosensores basados en células enteras han demostrado ser útiles para detectar compuestos en muestras ambientales, y podrían complementar los ensayos convencionales de toxicidad (Burmølle, Hansen y Sørensen, 2006; Lopreside Wan, Michelini, Roda y Wang., 2019; Nourmohammadi *et al.*, 2020).

El objetivo de este trabajo es examinar sustancias químicas capaces de contaminar el suelo y comprometer su fertilidad. Además, se estudian los indicadores empleados para medir la salud del suelo. Finalmente, se presentan genes reporteros junto con los microorganismos en los que se han identificado, con el propósito de utilizarlos como biosensores para el monitoreo de las condiciones y el estado de salud del suelo.

## INDICADORES DE LA SALUD DEL SUELO

En los próximos diez años, la seguridad alimentaria dependerá de la calidad del suelo. Además, en la actualidad, las actividades antropogénicas modifican directamente el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos (Sousa, Bragança, da Silva y Oliveira, 2024), repercutiendo en la producción de materias primas para la industria alimentaria y afectando a las principales economías mundiales. (Sartori *et al.*, 2024). Por lo tanto, es necesario el monitoreo de la salud del suelo (Figura 1) para generar información que permita el mantenimiento de la biodiversidad y salvaguardar la producción agrícola sostenible, siendo la calidad del suelo fijada en características físicas, químicas y biológicas (Trivedi, Delgado, Anderson y Singh, 2016).

### Indicadores Físicos

Las propiedades físicas que determinan calidad del suelo varían según las zonas geográficas y sus características; el cual se refleja en la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como limitaciones que se pueden encontrar en crecimiento de raíces y de plántulas (Tale e Ingole, 2015). Los factores para considerar son:

- Estructura y porosidad: los suelos con condiciones aceptables soportan la infiltración de agua, aire, resisten compactación, admite penetración de raíces generando macro poros que genera difusión de gases que intervienen en la actividad biológica (Keller *et al.*, 2021).

- Textura: se describe como al contenido de arena, limo y arcilla, que a su vez influye en la retención de agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de plantas y microorganismos (Wei *et al.*, 2023).

- Color: indica la presencia o ausencia de materia orgánica y nutrientes; sin embargo, es propiedad que debe ser complementada por indicadores químicos (Rakotonindrina *et al.*, 2023).

- Temperatura: determina la actividad biológica y química de la cobertura terrestre. Hashimoto y Suzuki (2017) revelan aumentos de temperatura promedio de 2.5 °C al hacer mediciones a diferentes profundidades de suelo, tomando en cuenta la presencia o ausencia de vegetación, siendo directamente la cobertura vegetal el factor que modifica la actividad biológica, concluyendo que, comprender y gestionar las propiedades físicas del suelo es clave para garantizar su conservación y promover uso sostenible.

Una mejor calidad del suelo no solo impulsa la productividad agrícola, sino que también contribuye al equilibrio de los ecosistemas terrestres (Akchaya *et al.*, 2025).

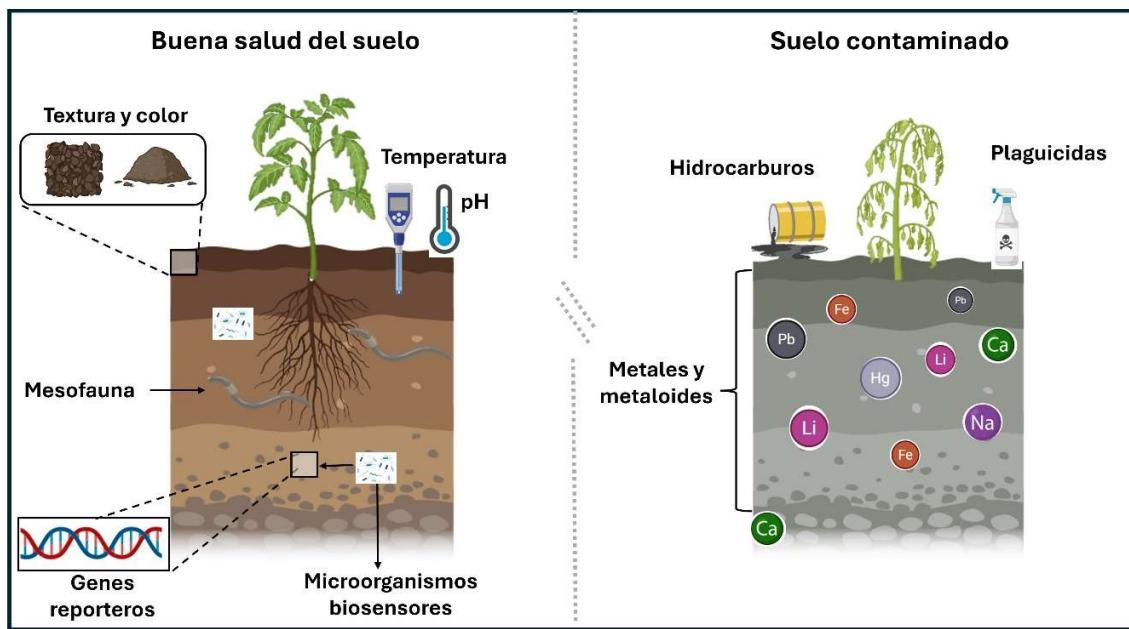
### Indicadores Químicos

Los compuestos químicos presentes en el suelo generan información importante para valorar la fertilidad y estado de degradación (Dudek, Labaz, Bednik y Medyńska, 2022). Son evaluados los nutrientes indispensables para el funcionamiento fisiológico de organismos vivos y disponibilidad como carbono orgánico total, carbono orgánico lúbil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno mineralizable (Obalum, Chibuike, Peth y Ouyang, 2017). Los indicadores químicos que muestran la salud del suelo son:

- pH: Define metabólicamente la actividad química y biológica, tiene alto impacto en biodisponibilidad de nutrientes para la absorción de estos. El rango de 6.5 y 7.0 son valores óptimos en suelos agrícolas para obtener mayor rendimiento en productividad. Cambios en pH generan desbalance causando deficiencias en desarrollo, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Hartemink y Barrow, 2023).

- Conductividad eléctrica: determina la capacidad para transmitir corriente eléctrica, es directamente proporcional a la cantidad de sales disueltas en el agua presente en suelo; ausencia o presencia de sales define el éxito en crecimiento de vegetal y microbiano (Guan, Grote, Schott y Leverett, 2022).

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC), es la carga eléctrica negativa de arcillas y materia orgánica del suelo y puede ser permanente o dependiente del pH, en función del tipo de arcilla (López-Báez *et al.*, 2019). Su importancia radica en que con ella se puede conocer el porcentaje de saturación o cantidad relativa de bases en el suelo, lo cual determina su fertilidad y se ha demostrado que en los suelos con menos de 25% de arcilla y mayor contenido de MO, la CIC también es influenciada por pH del suelo (Cruz-Macías *et al.*, 2020).



**Figura 1. Análisis comparativo de los componentes y características de los suelos contaminados frente a aquellos con buena salud.**

**Figure 1. Comparative analysis of the components and characteristics of contaminated soils versus soils with good health.**

- Capacidad amortiguadora del suelo. Se refiere a la habilidad del suelo para mantener su pH cuando se añaden ácidos o bases. Esta capacidad es crucial para determinar cómo el pH del suelo cambiará ante la adición de diferentes sustancias químicas. Este poder amortiguador depende de la presencia de minerales (óxidos de calcio, magnesio, potasio y carbonatos), contenido y tipo de acidez, cantidad y tipo de arcillas, materia orgánica y del pH inicial que tiene el suelo. Con respecto a la materia orgánica, los grupos funcionales ácidos débiles pueden actuar; asimismo, como pares conjugados ácido-base, otorgándole alta capacidad amortiguadora al suelo. La diversidad de estos grupos (carboxílicos, fenólicos y otros) provee a la materia orgánica posibilidad de actuar como buffer en amplio rango de pH (Zapata-Hernández, 2004; Van Rensburg, Claassens y Beukes, 2009; Bennardi *et al.*, 2018).

Los indicadores químicos del suelo son clave para evaluar su fertilidad y estado de degradación, ya que sus factores permiten valorar la capacidad para sustentar vida y optimizar su manejo. Un análisis adecuado ayuda a mitigar la degradación ambiental y promover sostenibilidad agrícola (Lourencetti *et al.*, 2023; Lucas *et al.*, 2025).

## Indicadores Biológicos

El cambio en los indicadores físicos y químicos manifiesta variaciones en la actividad biológica, provocando perdida de nichos ecológicos. Los organismos presentes se ven afectados por las concentraciones de Carbono, cambiando la actividad deshidrogenasa y fenol oxidasa en el suelo (Veum, Goyne, Kremer, Miles y Sudduth, 2014). En esta clasificación son incluidos bacterias, hongos, nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Wilhelm, Amsili, Kurtz, van Es y Buckley, 2023; Kim *et al.*, 2022). Las funciones principales incluyen tasa de respiración, ergosterol, tasas de descomposición de los residuos vegetales, nitrógeno y carbono de la biomasa microbiana (Crowther *et al.*, 2019). Las características biológicas principales para verificar la salud del suelo son:

- Materia orgánica: presencia de fuentes de carbono en el suelo afecta directamente su fertilidad, estructura, capacidad para proporcionar nutrientes a las plantas-microrganismos y retener agua para mantener humedad (Trivedi *et al.*, 2015). Además, participa activamente en el ciclo del carbono como depósito del mismo presente en la atmósfera y vegetación terrestre, proporciona capacidad de intercambio catiónico (CIC) que se une con nutrientes del suelo como amonio, calcio, magnesio y potasio (Lal, 2015). Así mismo, el nitrógeno en el suelo está directamente relacionado con la producción y funcionamiento de proteínas estructurales; así como biomoléculas con capacidad enzimática donde los microorganismos y plantas se benefician para obtener desarrollo óptimo (Hurisso *et al.*, 2018).

- Respiración: indica la actividad metabólica microbiana representada por cantidad de dióxido de carbono que produce el suelo, donde a mayor cantidad de materia orgánica aumenta la presencia de organismos vivos e intercambio gaseoso de suelo-atmosfera (Tahat, Alananbeh, Othman y Leskovar, 2020).

- Actividad enzimática: los organismos procariontes producen enzimas para desdoblar moléculas de aproximadamente 30 carbonos, por lo que la actividad microbiana es representada por las reacciones bioquímicas presentes en el suelo (Ghosh et al., 2024).

- Hongos micorrízicos arbusculares: microorganismos que tienen efecto en la estructura del suelo por presencia de micelios que dan estabilidad a la rizosfera (De Novais et al., 2019), estos microorganismos liberan glicoproteínas como la glomalina que se aglutina para dar estabilidad al suelo (Singh et al., 2022). Además, tienen función biológica cuando forman simbiosis con las raíces de plantas, que se benefician con absorción de nutrientes y protección contra fitopatógenos presentes en el suelo (Fall et al., 2022).

- Mesofauna edáfica: grupo de organismos que incluye lombrices, artrópodos, ácaros y nematodos, son biomarcadores por el grado de sensibilidad y respuesta a agentes químicos tóxicos con presencia en el suelo, lo que provoca reducción en densidad y diversidad de invertebrados (Vanolli et al., 2024).

Comprender estos factores permite identificar las alteraciones que afectan los ecosistemas y guiar estrategias de conservación y manejo sostenible. Garantizar la preservación de los nichos ecológicos es esencial para mantener el equilibrio entre los procesos naturales y la productividad del suelo (Wang et al., 2024).

## Indicadores Genómicos

Con el estudio de los genomas completos y genes de referencia para especies que participan en el sistema dinámico del suelo, se puede determinar abundancia de macroorganismos y microorganismos. De forma similar, la detección de un gen o *cluster* de genes y el análisis bioinformático promete exploración continua de las prácticas agrícolas, perturbaciones y fertilidad del suelo. Los componentes fisicoquímicos del suelo representan directamente los rasgos genómicos con inferencias ecológicas que forman la historia de vida de organismos vivos en el suelo, que, basado en las estrategias del microbioma ofrece información valiosa de los rasgos que caracterizan la salud del suelo y son causantes de adaptaciones metabólicas en los microorganismos, los cuales pueden ser denominados generalistas o especialistas, extremófilos o tolerantes al estrés, según las propias características del suelo donde se desarrollan (Wilhelm et al., 2023).

Wu, Cui, Peng, Zhang y Liesack (2022a), estudiaron el mecanismo a variaciones de disponibilidad de fósforo en sistemas agrícolas y de reforestación, utilizando técnicas de genómica y metagenómica de los organismos vivientes en el suelo, descubriendo que el gen *GCD* que codifica para quinoproteína glucosa deshidrogenasa unida a la membrana, es el mejor gen para determinar fósforo biodisponible en el suelo.

La genómica y metagenómica del suelo ofrecen herramientas innovadoras para comprender los organismos que habitan, se adaptan y prosperan en diferentes condiciones, ya que a partir de una muestra de suelo y posterior a su procesamiento; es posible ensamblar el metagenoma, agrupar especies por genoma, clasificarlas taxonómicamente y finalizar obteniendo funcionalidad de las secuencias ensambladas (Qayyum Ishaq, Ali, Kayani y Huang, 2025). Estas técnicas permiten identificar genes relevantes que reflejan disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo (Wu et al., 2022b). Este enfoque no solo mejora las prácticas agrícolas, sino que también, contribuye a la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres al vincular características del suelo con las estrategias metabólicas de sus organismos (Nwachukwu y Babalola, 2022).

## ELEMENTOS QUE ALTERAN LA SALUD DEL SUELO

De forma natural, los suelos contienen variedad de sustancias donde se incluyen compuestos inorgánicos como: metales, no metales, sulfatos, carbonatos, fosfatos, nitratos (Sahu, Bag, Chatterjee y Mukherjee, 2017); así mismo, contiene sustancias orgánicas como lípidos, hidrocarburos, ácidos grasos y alcoholes; donde, dependiendo de la ubicación geográfica, provee cantidad importante de elementos inorgánicos. Por otra parte, la descomposición biológica generada por microrganismos presentes en el suelo, produce moléculas orgánicas (Utobo y Tewari, 2015).

Una zona en la que los niveles naturales de compuestos inorgánicos y orgánicos exceden los estándares necesarios para el desarrollo de la vida, se clasifica como contaminación natural. Por otro lado, la contaminación antropogénica se produce cuando compuestos procedentes de fuentes fijas se acumulan en grandes cantidades en el suelo debido a actividades como la quema de combustibles, derrames químicos y prácticas agrícolas (Sánchez-Castro, Molina, Prieto y Segura, 2023).

## Metales y Metaloides

Fuentes naturales como zonas volcánicas y sus residuos, rocas sedimentarias y erosiones de rocas pueden incorporar metales y metaloides al suelo (Alengebawy, Qureshi, y Wang, 2021). Otras fuentes de estos contaminantes pueden ser actividades antropogénicas como las industriales, la metalurgia, disposición final de residuos peligrosos y fertilizantes químicos (Mikkonen *et al.*, 2018). Los agentes contaminantes tóxicos que se adjuntan al suelo son: Plata (Ag), Arsénico (As), Bismuto (Bi), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Paladio (Pd), Platino (Pt), Antimonio (Sb) (Fu, Chen, Huang, Qu y Wei, 2021). La consecuencia principal es la bioacumulación en organismos, lo que significa que el metabolismo de xenobióticos no desecha los elementos de alto peso molecular y a través del tiempo, aumenta la concentración (Ali y Khan, 2018).

Dentro de los efectos nocivos de los metales y metaloides en el suelo se encuentra reducción en reacción enzima-sustrato, los cuales se unen directamente a los sitios activos bloqueando el paso de sustratos provocando inhibición competitiva a la reacción catalítica (Jaworska y Lemanowicz, 2019). Además, generan radicales libres capaces de dañar enzimas, reducir su actividad (Martínez, Cancela y Virgolini, 2011) y generar alteración estructural, lo que afecta su actividad catalítica; por ejemplo el cobre intracelular en niveles elevados está relacionado con fibrosis renal, afecta la acción de la enzima lisil oxidasa, altera el metabolismo, reduce su actividad y afecta la solubilización de elastina y colágeno (Niu *et al.*, 2020).

## Petróleo e Hidrocarburos

Los componentes principales del petróleo crudo son carbono (82% - 85 %) e hidrógeno (10% - 14%), y en menores proporciones azufre (0.1% - 7.0%), nitrógeno (0.02% - 2.00 %) y oxígeno (0.1% - 1.00%) (Stepanova, Gladkov, Osipova, Gladkova y Tereshonok, 2022). Mekonnen, Aragaw y Genet (2024) reportan que el petróleo se clasifica de acuerdo con su composición en fracción ligera (densidad 0.65 g cm<sup>-3</sup> - 0.87 g cm<sup>-3</sup>), fracción intermedia (densidad 0.87 g cm<sup>-3</sup> - 0.91 g cm<sup>-3</sup>) o fracción pesada (densidad 0.91 g cm<sup>-3</sup> - 1.05 g cm<sup>-3</sup>). El petróleo y sus derivados se clasifican en cuatro categorías que dependen de su estructura química y origen geográfico de extracción: saturados (compuestos de cadena lineal, ramificada y cílicos); aromáticos (monocíclicos, policíclicos); asfaltenos (fenoles, ácidos grasos, cetonas, ésteres parafínicos) y resinas (piridinas, quinolinas, carbazoles, sulfóxidos, amidas) (Kebede, Tafese, Abda, Kamaraj y Assefa, 2021).

Cuando estos compuestos entran en contacto con el suelo la porosidad, permeabilidad y capacidad de retención de agua se ve afectada, provoca disminución drástica en la fertilidad del suelo al reaccionar químicamente con nutrientes clave como nitrógeno y fósforo, eliminándolos casi por completo; así mismo, durante su degradación, el petróleo libera sustancias químicas tóxicas que causan pudrición de las raíces de las plantas interrumpiendo procesos biológicos esenciales. Además, destruye microorganismos endófitos, que desempeñan papel crucial en el ciclo de nutrientes y estructuración del suelo. Como resultado, el suelo pierde su capacidad para sustentar la vida vegetal y microbiana, afectando negativamente los ecosistemas y limitando su recuperación natural (Mohanta, Pradhan y Behera, 2023).

## Plaguicidas

La salud del suelo se ve afectada por factores bióticos como insectos, malezas, bacterias y hongos denominados patógenos, promoviendo que plagas y enfermedades generen cambios en los ciclos biogeoquímicos (Duan *et al.*, 2023). Como estrategia de control son utilizados formulaciones plaguicidas que prosperan en la eliminación de estos. La clasificación química de dichos plaguicidas proporciona información sobre los compuestos añadidos al suelo, los cuales se agrupan en cuatro categorías principales: organoclorados (dcloro difenil tricloroetano, bencenohexacloruro), organofosforados (malatión, temefos, fentión, diclorvos, fenitrotión, metil pirimifos), carbamatos (propoxur, bendicarb, carbaryl) y piretroides (deltametrina, cíflutrina, bifentrina, lambda-cihalotrina, permetrina) (Yadav y Devi, 2017). Los plaguicidas y pesticidas coexisten con los componentes principales del suelo, en especial cuando el uso y aplicación son continuos y excesivos se genera reservorio (Carretta, Masin y Zanin, 2022). Por otra parte, la lluvia puede generar dos efectos: primero, funciona como transporte para reunir varios compuestos químicos y hacerlos reaccionar generando contaminantes aún sin describir en la actualidad; segundo, puede arrastrar compuestos químicos y distribuirlos en una superficie mayor o bien integrarlos en cuerpos de agua para posteriormente ser absorbidos por plantas, animales e incluso seres humanos (Ahmad *et al.*, 2024).

## BIOSENSORES

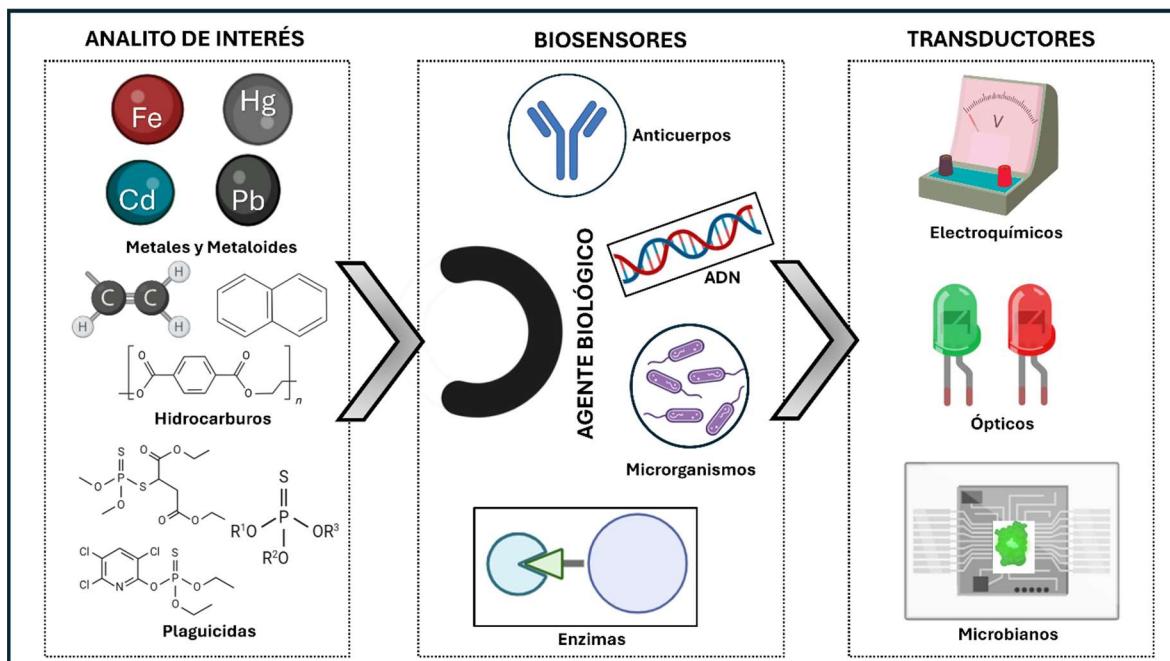
Los biosensores son instrumentos utilizados para la detección cualitativa y cuantitativa de sustancias o analitos predeterminados o específicos. Son dispositivos con agentes biológicos que actúan como intermediarios para el reconocimiento del analito (Changtor *et al.*, 2024). Estos están compuestos por tres partes: el sensor biológico, transductor y detector. El sensor biológico puede ser un tejido, un cultivo de microorganismos, enzimas, anticuerpos, cadenas de ácidos nucleicos, entre otros (Siontorou y Georgopoulos, 2016).

Los microorganismos presentan mecanismos moleculares para la detección de amplia gama de sustancias químicas y sus mezclas son ajustables a diferentes condiciones de reacción. Además, pueden ser utilizados organismos genéticamente modificados, con características altamente específicas para analitos que permite la automatización del monitoreo en la industria ambiental, seguridad alimentaria y medicina (Bustamante-Torres, Torres, Abad-Sojos, Pardo y Bucio, 2024).

El principio de un biosensor se representa en la Figura 2; su función implica la interacción entre la sustancia de interés a monitorear, controlar o remediar (analito); pueden ser sustancias orgánicas, inorgánicas o sujetos microbiológicos que se encuentran en agua, suelo, atmósfera o ser de importancia para evaluar la salud humana. Estos analitos son reconocidos por el biosensor (anticuerpo, DNA, enzimas o microorganismos), para después emitir un elemento señal en respuesta a la interacción con el analito. Estas señales podrían ser fluorescencia, luminiscencia, cambios de color, cambios de pH o potencial eléctrico. Estas señales son detectadas y traducidas a magnitudes de medición por equipos llamados transductores (Huang *et al.*, 2023; Bhatia, Paul, Acharjee, y Ramachairy, 2024).

### Transductores Electroquímicos

Son electrodos selectivos de iones específicos con actividad de sensor, midiendo la actividad iónica con el cambio de la corriente, potencial y conductividad eléctrica, causados por la variación en la concentración de analitos (Lobsey, Rossel y McBratney, 2010).



**Figura 2. Mecanismo general de biosensor para el monitoreo de sustancias a partir de elementos de detección y lectores de señales emitidas por el biosensor.**

**Figure 2. General biosensor mechanism for monitoring substances based on detection elements and signal readers emitted by the biosensor.**

- Biosensores microbianos amperométricos: son sistemas bioelectroquímicos que conducen la electricidad mediante procesos metabólicos utilizando biológicamente células vivas (Andriukonis, Celiesiute-Germaniene, Ramanavicius, Viter y Ramanavicius, 2021); en el funcionamiento se emplean enzimas de la familia de oxirreductasas, las oxidadas son orientadas al consumo del sustrato a través de la generación de productos y las deshidrogenasas con capacidad de transferir electrones (Schachinger, Chang, Scheiblbrandner y Ludwig, 2021). Mulchandani, Chen, Mulchandani, Wang y Chen (2001), desarrollaron un biosensor amperométrico mediante la aplicación de enzima hidrolasa y la determinación amperométrica de p-nitrofenol, utilizando sistema de anclaje en el organismo *Moraxella* sp., la medición directa de plaguicidas organofosforados repercute directamente en la salud del suelo.

- Transductor potenciométrico: frecuentemente se describen como dos electrodos, clasificados en electrodo de referencia que se encuentra sumergido en concentraciones estándar de iones que es calculada mediante la ecuación de Henderson (Ammann, 1986), y un electrodo que contiene portador para el analito con el fin de realizar mediciones potenciométricas de la concentración (Rosenberg et al., 2018). Baumbauer et al. (2022), diseñaron sensores potenciométricos de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en el suelo; la presencia de compuestos nitrogenados es indicador de buena salud del suelo, donde el resultado de estos diseños tiene sensibilidad de  $-48.0 \pm 3.3 \text{ mV decade}^{-1}$  en solución y  $-47 \text{ mV decade}^{-1}$  en suelo. Además, no existe interferencia en concentraciones altas y bajas de sulfato, cloruro, fosfato, nitrito, amonio, potasio y magnesio presentes en el suelo.

Los electrodos selectivos de iones permiten monitorear la salud del suelo al medir parámetros iónicos clave. Estos sensores detectan compuestos específicos y analizan concentraciones de analitos, proporcionando datos esenciales para evaluar la calidad del suelo y promover su manejo sostenible (Xie, Zhou, Fu, Zhan y Wu, 2024).

## Biosensores Ópticos

Los sistemas ópticos modulan el haz de luz que permite generar un espectro reflejado en frecuencias; los componentes presentes en el suelo hacen que los enlaces moleculares individuales vibren, ya sea doblándose o estirándose, el espectro de absorción genera emisión óptica que es visible en rango de 400 nm - 780 nm (Mohapatra y Lenka, 2015). Las señales cuantitativas como la intensidad, el color o la longitud de onda integran dispositivos para evaluar el contenido de nutrientes presentes en el suelo o la detección de sustancias específicas y sus concentraciones en el suelo (Mukherjee y Laskar, 2019).

Los métodos comunes para detectar contaminantes en suelo son espectroscopia de emisión, de masas, cromatografía de gases, etc., pero estas técnicas son costosas, por lo que el uso de biosensores se está volviendo popular (Mathur, Singh y Ranjan, 2023). Por ejemplo, ya que la medición directa de contaminantes del suelo es esencial para evaluar riesgos, Zhang, Qiu, Wang y Liu (2023) crearon cinco biosensores ópticos para detectar p-nitrofenol, un intermediario en la síntesis de plaguicidas y solventes con potencial mutagénico, a partir de la identificación y modificación de genes de *E. coli*. Estos biosensores son capaces de detectar concentraciones de entre  $6.21 \mu\text{g kg}^{-1}$  -  $25.2 \mu\text{g kg}^{-1}$  de p-nitrofenol en cuatro tipos diferentes de suelo a partir de proteínas reporteras fluorescentes.

Los sistemas ópticos y los biosensores son instrumentos clave para analizar la calidad del suelo. Su precisión en la detección de nutrientes y contaminantes resalta su valor en el monitoreo ambiental y en la implementación de estrategias sostenibles para diferentes tipos de suelos (Sharma y Sharma, 2023).

## Biosensores Microbianos

Son sensores con propiedades bioelectroquímicas produciendo energía eléctrica a través de la acción de microorganismos específicos. Estos microorganismos son catalizadores para convertir energía química directamente en electricidad mediante la transferencia de electrones generados por la oxidación de compuestos orgánicos (Lim et al., 2015). El funcionamiento de microorganismos como biosensores es variado; por ejemplo, los genéticamente codificados o sintéticos, que son dirigidos a moléculas productoras de energía, especies reactivas de oxígeno y adenosín monofosfato cíclico (AMPc) (Vigneshvar, Sudhakumari, Senthilkumaran y Prakash, 2016; Ahmad et al., 2020). La estrategia es que las proteínas biológicas se unen a los analitos y segundos mensajeros generando luminiscencia fluorescente en la interacción microorganismos-analito (Oldach y Zhang, 2014).

Un ejemplo de esta tecnología son las celdas microbianas de energía en el suelo, que originalmente fueron pensadas para generar electricidad a partir de la materia orgánica del suelo y los microorganismos presentes en él, los cuales cuentan con capacidad electroactiva y mediante la interpretación de la señal eléctrica funcionan como herramienta de detección de la contaminación del suelo como monitoreo autoalimentado (Abbas et al., 2022).

## GENES REPORTEROS DE CONTAMINANTES

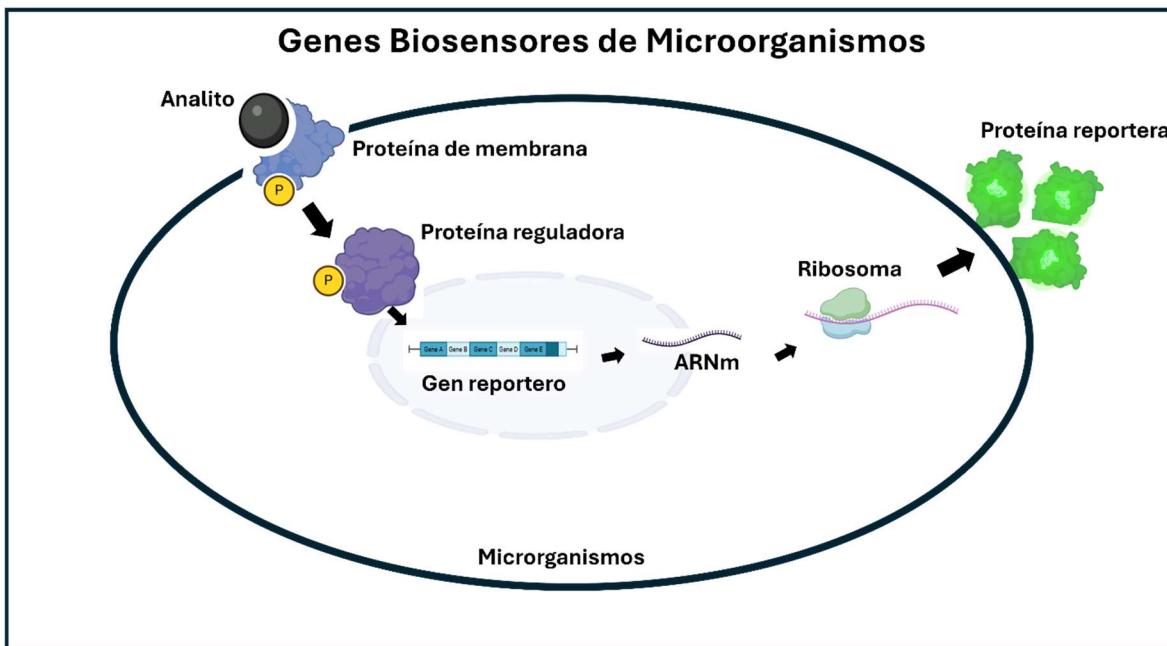
La información genética codifica señales que se detectan fácilmente en presencia de analitos. Los genes reporteros emiten señales con amplia sensibilidad, cuyas características permiten que los microorganismos funcionen como biosensores; la información en sus genes produce señales cuando hay analito específico indicando su presencia, finalmente, estas señales pueden visualizarse por cambios de color o fluorescencia dentro o fuera de la célula, como se representa en la Figura 3 (Aynalem y Muleta 2021; Brutesco et al., 2017).

Los microorganismos contienen información genética no esencial para la célula en condiciones normales de crecimiento, por lo tanto, estos procesos son los que permiten que los microorganismos respondan a cambios en su ambiente, alterando la expresión de los genes y así, cambiar el grupo de proteínas presentes en la célula (Tellechea-Luzardo, Stiebitz y Carbonell, 2023; Herath et al., 2023).

Los microorganismos biosensores utilizan circuito genético simple que consta de sistema regulador o sensor y uno o más genes reporteros. En el Cuadro 1 se muestran ejemplos de genes reporteros. Este sistema está compuesto por gen regulador y su promotor, formando complejo que controla la transcripción del gen reportero desde el promotor objetivo, activándose cuando la molécula efectora está presente en la célula (Lopreside et al., 2019; Brandsen, Mattheisen, Noel y Fields, 2018). Dicho mecanismo molecular codifica la expresión de proteína receptora transmembranal en la superficie celular, esta proteína se une a una molécula específica, generando cascada de señales que resulta en comportamiento biológico (Wang et al., 2015).

**Cuadro 1. Genes de receptores y reporteros, capaces de detectar y producir señales en presencia de analitos relacionados a la salud del suelo.**  
**Table 1. Receptor and reporter genes capable of detecting and producing signals in the presence of analytes related to soil health.**

Microorganismo	Gen Reportero	Analito detectado	Tipo de Biosensor	Referencia
<i>Pseudomonas</i>	AtzR	Cyanuric acid (CYA)	Biosensores Óptico	Liu et al. (2019)
<i>Escherechia coli</i> - pPNARGFP	narGHJI - (Pnar)	Nitratos	Biosensores ópticos	Taylor, Bain, Richardson, Spiro, y Russell (2004).
<i>Magnetospirillum magneticum</i> AMB-1 y <i>Magnetospirillum gryphiswaldense</i> MSR-1	ArsR	Arsénico	Biosensores microbianos magnéticos	Dieudonné, Prévéréal y Pignol (2020)
<i>Achromobacter</i> sp. AO22	copR	Cobre	Biosensores microbianos electroquímicos	Ng, Palombo y Bhave (2012)
<i>E. coli</i> MG1655	cueR, copA, cusCFBA, zntR, zntA	Cadmio	Biosensores Microbianos Ópticos	He et al. (2021)
<i>Escherichia coli</i> (T7-lux-E. coli, T3-lux-E. Coli y SP6-lux-E. coli)	chrB y luxAB	Cromato	Biosensores Microbianos Ópticos	Wang et al. (2023)
Bacteriófagos	norD y norQ	Pesticidas organoclorados (clorobenceno, diclorobenceno y nitroclorobenceno)	Biosensores Microbianos ópticos	Zheng et al. (2022)
<i>Halomonas</i> , <i>Acenitobacter</i>	nah, phd, nag, nid, pdo, nar	Hidrocarburos Aromaticos policíclicos	Biosensores Microbianos ópticos	Li et al. (2022)
<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1, <i>Geobacter sulfurreducens</i> y <i>Alcaligenes faecalis</i>	GSU3274	Tetraciclinas	Celdas Microbianas electroquímicas	Zhao et al. (2021).
<i>Cyclobacteriaceae</i> y <i>Vicinamibacteriales</i>	ugpB, ugpC y ugpQ	Disponibilidad de fosforo	Biosensor genómico	Wu et al. (2022b)



**Figura 3. Funcionamiento genético de microorganismo con genes reporteros como biosensor.**  
**Figure 3. Genetic functioning of a microorganism with reporter genes as a biosensor.**

## CONCLUSIONES

En esta revisión se presentó la importancia del suelo en el contexto de los diferentes servicios medioambientales que proporciona, la biodiversidad que sustenta y el suministro de alimentos. Asimismo, como el aumento poblacional, el crecimiento de la industria y la demanda de alimentos contribuyen al deterioro en la salud del suelo, la cual, como se describió, es determinada por diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas.

Resalta la importancia de contar con herramientas analíticas rápidas y económicas para detectar contaminantes, tal como lo son los biosensores, con la finalidad de que gobiernos, investigadores y el sector productor de alimentos puedan actuar oportunamente contra la perdida de fertilidad, degradación del suelo y contaminantes como metales, metaloides, hidrocarburos, plaguicidas, etc.

Los biosensores no sustituyen a los métodos analíticos tradicionales, sin embargo, son una forma rápida para detectar agentes tóxicos, lo que permite tomar acciones oportunas. Actualmente, mediante genes reporteros es posible detectar compuestos contaminantes como el ácido cianhídrico, nitratos, arsénico, cobre, cadmio, pesticidas, hidrocarburos, antibióticos, incluso cuantificar la disponibilidad de fosforo.

A partir de esta información, se establece que es necesario continuar investigando para aumentar el universo de posibilidades en la aplicación de los genes reporteros como biosensores, estos aspectos deben abordarse conforme se desarrollan nuevos biosensores y se sintetizan nuevos genes reporteros. Además, es preciso investigar la posibilidad de falsos positivos y minimizarlos al máximo para que alcancen el nivel comercial y puedan aprovecharse las principales bondades de esta tecnología, es decir: la facilidad, practicidad y rapidez de su uso. Es necesario remarcar que se debe priorizar no dejar de lado la costeabilidad para el usuario final.

## 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.

## FINANCIACIÓN

No aplicable.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.P.C.M. y J.N.R.V. Metodología: J.A.Ch.S. Validación: J.P.Ch.M., J.N.R.V., J.A.C.S., I.A.O.S y C.A.A.F. Investigación: J.P.C.M. Escritura: preparación del borrador original: J.P.C.M. y J.N.R.V. Escritura: revisión y edición: J.A.C.S. y I.A.O.S. Visualización: C.A.A.F. Supervisión: J.P.C.M. Administración del proyecto: J.P.C.M.

## AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

## LITERATURA CITADA

Abbas, S. Z., Wang, J. Y., Wang, H., Wang, J. X., Wang, Y. T., & Yong, Y. C. (2022). Recent advances in soil microbial fuel cells based self-powered biosensor. *Chemosphere*, 303, 135036. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135036>

Ahmad, M. F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyauallah, M., AlShahrani, A. M., Muzammil, K., ... & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Helijon*, 10(7), 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128>

Ahmad, R. G., & Kumar, V. (2020). Microorganism based biosensors to detect soil pollutants. *Plant Archives*, 20(2), 2509-2516.

Akchaya, K., Parasuraman, P., Pandian, K., Vijayakumar, S., Thirukumaran, K., Mustaffa, M. R. A. F., ... & Choudhary, A. K. (2025). Boosting resource use efficiency, soil fertility, food security, ecosystem services, and climate resilience with legume intercropping: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1-22. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527256>

Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 1-33. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>

Ali, H., & Khan, E. (2018). Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs-Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(6), 1353-1376. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>

Ammann, D. (1986). *Ion-selective microelectrodes: principles, design and application*. Berlin: Springer-Verlag.

Andriukonis, E., Celiesiute-Germaniene, R., Ramanavicius, S., Viter, R., & Ramanavicius, A. (2021). From microorganism-based amperometric biosensors towards microbial fuel cells. *Sensors*, 21(7), 2442. <https://doi.org/10.3390/s21072442>

Aynalem, B., & Muleta, D. (2021). Microbial biosensors as pesticide detector: an overview. *Journal of Sensors*, 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/5538857>

Baumbauer, C. L., Goodrich, P. J., Payne, M. E., Anthony, T., Beckstoffer, C., Toor, A., ... & Arias, A. C. (2022). Printed potentiometric nitrate sensors for use in soil. *Sensors*, 22(11), 1-13. <https://doi.org/10.3390/s22114095>

Bennardi, D. O., Díaz-Gorostegui, A., Juan, L., Millan, G., Pellegrini, A. E., & Vázquez, M. E. (2018). Evaluación de la capacidad buffer de suelos ácidos de la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*, 36(1), 30-38.

Bhatia, D., Paul, S., Acharyya, T., & Ramachairay, S. S. (2024). Biosensors and their widespread impact on human health. *Sensors International*, 5, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2023.100257>

Blanco-Canqui, H., Ruis, S. J., & Francis, C. A. (2024). Do organic farming practices improve soil physical properties?. *Soil Use and Management*, 40(1), 1-15. <https://doi.org/10.1111/sum.12999>

BrandSEN, B. M., Mattheisen, J. M., Noel, T., & Fields, S. (2018). A Biosensor Strategy for *E. coli* Based on Ligand-Dependent Stabilization. *ACS Synthetic Biology*, 7(9), 1990-1999. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00052>

Brutesco, C., Préveral, S., Escoffier, C., Descamps, E. C. T., Prudent, E., Cayron, J., Dumas, L., ... & Ginet, N. (2017). Bacterial host and reporter gene optimization for genetically encoded whole cell biosensors. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(1), 52-65. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6952-2>

Burmølle, M., Hansen, L. H., & Sørensen, S. J. (2006). Reporter gene technology in soil ecology; detection of bioavailability and microbial interactions. En P. Nannipieri, K. Smalla, (Eds.) *Nucleic Acids and Proteins in Soil. Soil Biology*, (vol 8). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X\\_17](https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X_17)

Bustamante-Torres, M., Torres, O., Abad-Sojos, S., Pardo, S., & Bucio, E. (2024). Application of genetically modified microorganisms for bioremediation of polluted environments. In: *Genetically engineered organisms in bioremediation* (pp. 18-51). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003188568-2>

Carretta, L., Masin, R., & Zanin., G. (2022). Review of studies analysing glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) occurrence in groundwater. *Environmental Reviews*, 30(1), 88-109. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0106>

Changtor, P., Rodriguez-Mateos, P., Buddhachat, K., Wattanachaiyingcharoen, W., Iles, A., Kerdphon, S., ... & Pamme, N. (2024). Integration of IFAST-based nucleic acid extraction and LAMP for on-chip rapid detection of Agroathelia rolfsii in soil. *Biosensors & Bioelectronics*, 250, 116051. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116051>

Crowther, T. W., Van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M. A., Keiser, A. D., Mo, L., ... & Maynard, D. S. (2019). The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science*, 365(6455), eaav0550. <https://doi.org/10.1126/science.aav0550>

Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Laramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475-480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>

De Novais, C. B., Avio, L., Giovannetti, M., de Faria, S. M., Siqueira, J. O., & Sbrana, C. (2019). Interconnectedness, length and viability of arbuscular mycorrhizal mycelium as affected by selected herbicides and fungicides. *Applied Soil Ecology*, 143, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.06.013>

Dieudonné, A., Préveral, S., & Pignol, D. (2020). A Sensitive Magnetic Arsenite-Specific Biosensor Hosted in Magnetotactic Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(14), e00803-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00803-20>

Duan, M., Li, Y., Zhu, G., Wu, X., Huang, H., Qin, J., ... & Wang, Z. (2023). Soil chemistry, metabarcoding, and metabolome analyses reveal that a sugarcane-*Dictyophora indusiata* intercropping system can enhance soil health by reducing soil nitrogen loss. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1193990>

Dudek, M., Labaz, B., Bednik, M., & Medyńska-Juraszek, A. (2022). Humic Substances as Indicator of Degradation Rate of Chernozems in South-Eastern Poland. *Agronomy*, 12(3), 1-11. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030733>

Fall, A. F., Nakabonge, G., Ssekandi, J., Founoune-Mboup, H., Apori, S. O., Ndiaye, A., ... & Ngom, K. (2022). Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Fertility: Contribution in the Improvement of Physical, Chemical, and Biological Properties of the Soil. *Frontiers in Fungal Biology*, 3, 1-11. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892>

Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: a review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>

Ghori, N. H., Ghori, T., Hayat, M. Q., Imadi, S. R., Gul, A., Altay, V., & Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1807-1828. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8>

Ghosh, A., Singh, A. K., Kumar, S., Manna, M. C., Bhattacharyya, R., Agnihotri, R., ... & Chaudhari, S. K. (2020). Differentiating biological and chemical factors of top and deep soil carbon sequestration in semi-arid tropical Inceptisol: an outcome of structural equation modeling. *Carbon Management*, 11(5), 441-453. <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1796143>

Ghosh, S., Baltussen, M. G., Ivanov, N. M., Hajje, R., Jakšaitė, M., Zhou, T., & Huck, W. T. S. (2024). Exploring Emergent Properties in Enzymatic Reaction Networks: Design and Control of Dynamic Functional Systems. *Chemical Reviews*, 124(5), 2553-2582. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00681>

Guan, Y., Grote, K., Schott, J., & Leverett, K. (2022). Prediction of Soil Water Content and Electrical Conductivity Using Random Forest Methods with UAV Multispectral and Ground-Coupled Geophysical Data. *Remote Sensing*, 14(4), 1023. <https://doi.org/10.3390/rs14041023>

Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant Soil*, 486, 209-215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>

Hashimoto, S., & Suzuki, M. (2004). The impact of forest clear-cutting on soil temperature: a comparison between before and after cutting, and between clear-cut and control sites. *Journal of Forest Research*, 9(2), 125-132. <https://doi.org/10.1007/s10310-003-0063-x>

He, M. Y., Lin, Y. J., Kao, Y. L., Kuo, P., Grauffel, C., Lim, C., ... & Chou, H. H. D. (2021). Sensitive and Specific Cadmium Biosensor Developed by Reconfiguring Metal Transport and Leveraging Natural Gene Repositories. *ACS Sensors*, 6(3), 995-1002. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02204>

Herath, H. M. L. P. B., de Silva, W. R. M., Dassanayake, R. S., Gunawardene, Y. I. N. S., Jayasingha, J. R. P., Gayashan, M. K., ... & de Silva, K. M. N. (2023). Validation and calibration of a novel GEM biosensor for specific detection of Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup>. *BMC biotechnology*, 23(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12896-023-00820-7>

Huang, C. W., Lin, C., Nguyen, M. K., Hussain, A., Bui, X. T., & Ngo, H. H. (2023). A review of biosensor for environmental monitoring: principle, application, and corresponding achievement of sustainable development goals. *Bioengineered*, 14(1), 58-80. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2095089>

Hurisso, T. T., Moebius-Clune, D. J., Culman, S. W., Moebius-Clune, B. N., Thies, J. E., & van Es, H. M. (2018). Soil protein as a rapid soil health indicator of potentially available organic nitrogen. *Agricultural & Environmental Letters*, 3(1), 1-5. <https://doi.org/10.2134/ael2018.02.0006>

Jaworska, H., & Lemanowicz, J. (2019). Heavy metal contents and enzymatic activity in soils exposed to the impact of road traffic. *Scientific Reports*, 9(19981), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56418-7>

Kaur, H., Kumar, R., Babu, J. N., & Mittal, S. (2015). Advances in arsenic biosensor development-a comprehensive review. *Biosensors & Bioelectronics*, 63, 533-545. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.08.003>

Kebede, G., Tafese, T., Abda, E. M., Kamaraj, M., & Assefa, F. (2021). Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants in the soil: mechanisms and impacts. *Journal of Chemistry*, 2021(9823362) 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>

Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Schymanski, S. J., Weisskopf, P., Koestel, J., ... & Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1002-1020. <https://doi.org/10.1002/saj2.20240>

Kim, H., Park, Y. H., Yang, J. E., Kim, H. S., Kim, S. C., Oh, E., ..., & Yu, C. (2022). Analysis of major bacteria and diversity of surface soil to discover biomarkers related to soil health. *Toxics*, 10(3), 1-12. <https://doi.org/10.3390/toxics10030117>

Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

Li, Y., Li, W., Ji, L., Song, F., Li, T., Fu, X., ... & Wang, J. (2022). Effects of Salinity on the Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Oilfield Soils Emphasizing Degradation Genes and Soil Enzymes. *Frontiers in Microbiology*, 12, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.824319>

Lim, J. W., Ha, D., Lee, J., Lee, S. K., & Kim, T. (2015). Review of micro/nanotechnologies for microbial biosensors. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 3, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2015.00061>

Liu, X., Silverman, A. D., Alam, K. K., Iverson, E., Lucks, J. B., Jewett, M. C., & Raman, S. (2020). Design of a transcriptional biosensor for the portable, on-demand detection of cyanuric acid. *ACS Synthetic Biology*, 9(1), 84-94. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.9b00348>

Lobsey, C., Rossel, R. V., & McBratney, A. (2010). Proximal Soil Nutrient Sensing Using Electrochemical Sensors. En R. Viscarra-Rossel, A. McBratney, B. Minasny, (Eds.). *Proximal Soil Sensing* (pp. 77-88). Dordrecht: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8859-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8859-8_6)

López-Báez, W., Reynoso-Santos, R., López-Martínez, J., Villar-Sánchez, B., Camas-Gómez, R., & García-Santiago, J. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflor, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 897-910. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>

Lopreside, A., Wan, X., Michelini, E., Roda, A., & Wang, B. (2019). Comprehensive profiling of diverse genetic reporters with application to whole-cell and cell-free biosensors. *Analytical Chemistry*, 91(23), 1-9. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b04444>

Lourenetti, J., Bonini, C. D. S. B., Andreotti, M., Alves, M. C., Bonini-Neto, A., Santos, M. A., ... & de Figueiredo, R. W. R. (2023). Evolution of soil chemical fertility in an area under recovery for 30 years with anthropic intervention. *Sustainability*, 15(13), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su151310344>

Lucas, K. R. G., Ventura, M. U., Debiasi, H., Ralisch, R., Dos Santos, J. C. F., & Folegatti-Matssura, M. I. S. (2025). Soil chemical quality indicators for agricultural life cycle assessment: a case of study in Brazil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05859-3>

Martínez, S. A., Cancela, L. M., & Virgolini, M. B. (2011). El estrés oxidativo como mecanismo de acción del plomo: Implicancias terapéuticas. *Acta toxicológica Argentina*, 19(2), 61-79.

Mathur, S., Singh, D., & Ranjan, R. (2023). Genetic circuits in microbial biosensors for heavy metal detection in soil and water. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 652, 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.02.031>

Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1-21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422>

Mikhailova, E. A., Zurqani, H. A., Lin, L., Hao, Z., Post, C. J., Schlautman, M. A., & Shepherd, G. B. (2024). Possible integration of soil information into land degradation analysis for the united nations (UN) land degradation neutrality (LDN) concept: A case study of the contiguous United States of America (USA). *Soil Systems*, 8(1), 27. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010027>

Mikkonen, H. G., Dasika, R., Drake, J. A., Wallis, C. J., Clarke, B. O., & Reichman, S. M. (2018). Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentrations in soil. *Science of the Total Environment*, 624, 599-610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.131>

Mohanta, S., Pradhan, B., & Behera, I. D. (2023). Impact and remediation of petroleum hydrocarbon pollutants on agricultural land: A review. *Geomicrobiology Journal*, 41(4), 345-359. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2243925>

Mohapatra, A. G., & Lenka, S. K. (2015). Sensor system technology for soil parameter sensing in precision agriculture: a review. *Journal of Agricultural Physics*, 15(2), 1-22.

Mukherjee, S., & Laskar, S. (2019). Vis-NIR-based optical sensor system for estimation of primary nutrients in soil. *Journal of Optics*, 48(1), 87-103. <https://doi.org/10.1007/s12596-019-00517-1>

Mulchandani, P., Chen, W., Mulchandani, A., Wang, J., & Chen, L. (2001). Amperometric microbial biosensor for direct determination of organophosphate pesticides using recombinant microorganism with surface expressed organophosphorus hydrolase. *Biosensors & Bioelectronics*, 16(7-8), 433-437. [https://doi.org/10.1016/s0956-5663\(01\)00157-9](https://doi.org/10.1016/s0956-5663(01)00157-9)

Ng, S. P., Palombo, E. A., & Bhave, M. (2012). Identification of a copper-responsive promoter and development of a copper biosensor in the soil bacterium *Achromobacter* sp. AO22. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 28(5), 2221-2228. <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1029-y>

Niu, Y. Y., Zhang, Y. Y., Zhu, Z., Zhang, X. Q., Liu, X., Zhu, S. Y., ... & Yu, C. (2020). Elevated intracellular copper contributes a unique role to kidney fibrosis by lysyl oxidase mediated matrix crosslinking. *Cell Death & Disease*, 11(211), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41419-020-2404-5>

Nourmohammadi, E., Hosseinkhani, S., Nedaeinia, R., Khoshdel-Sarkarizi, H., Nedaeinia, M., Ranjbar, M., ... & Sadeghizadeh, M. (2020). Construction of a sensitive and specific lead biosensor using a genetically engineered bacterial system with a luciferase gene reporter controlled by pbr and cadA promoters. *BioMedical Engineering OnLine*, 19(79), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00816-w>

Nwachukwu, B. C., & Babalola, O. O. (2022). Metagenomics: a tool for exploring key microbiome with the potentials for improving sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.886987>

Obalum, S. E., Chibuike, G. U., Peth, S., & Ouyang, Y. (2017). Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(176), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>

Oldach, L., & Zhang, J. (2014). Genetically encoded fluorescent biosensors for live-cell visualization of protein phosphorylation. *Chemistry & Biology*, 21(2), 86-197. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2013.12.012>

Postigo, C., Ginebreda, A., Barbieri, M. V., Barceló, D., Martín-Alonso, J., de la Cal, A., ... & de Alda, M. L. (2021). Investigative monitoring of pesticide and nitrogen pollution sources in a complex multi-stressed catchment: The lower Llobregat River basin case study (Barcelona, Spain). *Science of the Total Environment*, 755, 142377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142377>

Pourret, O., & Hursthouse, A. (2019). It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 1-6. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224446>

Qayyum, H., Ishaq, Z., Ali, A., Kayani, M. U. R., & Huang, L. (2025). Genome-resolved metagenomics from short-read sequencing data in the era of artificial intelligence. *Functional & Integrative Genomics*, 25(124), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10142-025-01625-x>

Rakotonindrina, H., Moritsuka, N., Kawamura, K., Tsujimoto, Y., Nishigaki, T., Andrianary, H. B., ... & Andriamananjara, A. (2023). Prediction of the soil properties of Malagasy rice soils based on the soil color and magnetic susceptibility. *Soil Science and Plant Nutrition*, 69(1), 24-35. <https://doi.org/10.1080/00380768.2022.2136929>

Rosenberg, R., Bono Jr, M. S., Braganza, S., Vaishnav, C., Karnik, R., & Hart, A. J. (2018). In-field determination of soil ion content using a handheld device and screen-printed solid-state ion-selective electrodes. *PLoS One*, 13(9), 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203862>

Sahu, G., Bag, A. G., Chatterjee, N., & Mukherjee, A. K. (2017). Potential use of flyash in agriculture: A way to improve soil health. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 873-880.

Sánchez-Castro, I., Molina, L., Prieto-Fernández, M. Á., & Segura, A. (2023). Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil-Remediation techniques applied in real soil-contamination events. *Helion*, 9(6), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>

Sartori, M., Ferrari, E., M'Barek, R., Philippidis, G., Boysen-Urban, K., Borrelli, P., ... & Panagos, P. (2024). Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective integrated assessment of soil erosion on global food security. *Ecological Economics*, 219, 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108103>

Schachinger, F., Chang, H., Scheiblbrandner, S., & Ludwig, R. (2021). Amperometric Biosensors based on direct electron transfer enzymes. *Molecules*, 26(15), 1-32. <https://doi.org/10.3390/molecules26154525>

Sharma, K., & Sharma, M. (2023). Optical biosensors for environmental monitoring: Recent advances and future perspectives in bacterial detection. *Environmental Research*, 236, 116826. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116826>

Sharma, K., Walia, S. S., Dhaliwal, S. S., Saini, K. S., & Bhagat, R. (2023). Residual effect of nitrogen management on succeeding summer moong (*Vigna radiata*) under maize-wheat-moong rotation. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(7), 762-767. <https://doi.org/10.56093/ijas.v93i7.134678>

Singh, A. K., Zhu, X., Chen, C., Wu, J., Yang, B., Zakari, S., ... & Liu, W. (2022). The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(9), 1604-1638. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1862561>

Siontorou, C. G., & Georgopoulos, K. N. (2016). A biosensor platform for soil management: the case of nitrites. *Journal of Cleaner Production*, 111, 133-142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.038>

Sousa, R. D., Bragança, L., da Silva, M. V., & Oliveira, R. S. (2024). Challenges and solutions for sustainable food systems: The potential of home hydroponics. *Sustainability*, 16(2), 817. <https://doi.org/10.3390/su16020817>

Stepanova, A. Y., Gladkov, E. A., Osipova, E. S., Gladkova, O. V., & Tereshonok, D. V. (2022). Bioremediation of soil from petroleum contamination. *Processes*, 10(6), 1-17. <https://doi.org/10.3390/pr10061224>

Tahat, M. M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 1-26. <https://doi.org/10.3390/su12124859>

Tale, K. S., & Ingole, S. (2015). A review on role of physico-chemical properties in soil quality. *Chemical Science Review and Letters*, 4(13), 57-66.

Taylor, C. J., Bain, L. A., Richardson, D. J., Spiro, S., & Russell, D. A. (2004). Construction of a whole-cell gene reporter for the fluorescent bioassay of nitrate. *Analytical Biochemistry*, 328(1), 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2004.01.013>

Tellechea-Luzardo, J., Stiebritz, M. T., & Carbonell, P. (2023). Transcription factor-based biosensors for screening and dynamic regulation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1118702>

Trivedi, P., Delgado-Baquerizo, M., Anderson, I. C., & Singh, B. K. (2016). Response of soil properties and microbial communities to agriculture: implications for primary productivity and soil health indicators. *Frontiers in Plant Science*, 7, 990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00990>

Trivedi, P., Rochester, I. J., Trivedi, C., Van Nostrand, J. D., Zhou, J., Karunaratne, S., ... & Singh, B. K. (2015). Soil aggregate size mediates the impacts of cropping regimes on soil carbon and microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 91, 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.034>

Utobo, E. B., & Tewari, L. (2015). Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), 147-169. [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1301\\_147169](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1301_147169)

Van Rensburg, H., Claassens, A. S., & Beukes, D. J. (2009). Relationships between soil buffer capacity and selected soil properties in a resource-poor farming area in the mpu malanga Province of south Africa. *South African Journal of Plant and Soil*, 26(4), 237-243. <https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639961>

Vanolli, B. S., de Andrade, N., Canisares, L. P., Franco, A. L., Pereira, A. P., & Cherubin, M. R. (2024). Edaphic mesofauna responses to land use change for sugarcane cultivation: insights from contrasting soil textures. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1305115. <http://dx.doi.org/10.3389/fevo.2023.1305115>

Veum, K. S., Goyne, K. W., Kremer, R. J., Miles, R. J., & Sudduth, K. A. (2014). Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. *Biogeochemistry*, 117, 81-99. <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-013-9868-7>

Vigneshvar, S., Sudhakumari, C. C., Senthilkumaran, B., & Prakash, H. (2016). Recent advances in biosensor technology for potential applications - an overview. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 4, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00011>

Voon, C. H., Yusop, N. M., & Khor, S. M. (2022). The state-of-the-art in bioluminescent whole-cell biosensor technology for detecting various organic compounds in oil and grease content in wastewater: From the lab to the field. *Talanta*, 241, 123271. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123271>

Wang, G. H., Tang, C. H., Cheng, C. Y., & Chung, Y. C. (2023). Improving the practicality of recombinant Escherichia coli biosensor in detecting trace Cr (VI) by modifying the cryogenic storage conditions of biosensors and applying simple pretreatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 58(13), 1028-1038. <https://doi.org/10.1080/10934529.2024.2301905>

Wang, L., Lu, P., Feng, S., Hamel, C., Sun, D., Siddique, K. H., & Gan, G. Y. (2024). Strategies to improve soil health by optimizing the plant-soil-microbe-anthropogenic activity nexus. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 359, 108750. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108750>

Wang, W., Li, X., Li, Y., Li, S., Fan, K., & Yang, K. (2015). A genetic biosensor for identification of transcriptional repressors of target promoters. *Scientific Reports*, 5(1), 15887. <https://doi.org/10.1038/srep15887>

Wei, B., Peng, Y., Lin, L., Zhang, D., Ma, L., Jiang, L., ... & Wang, Z. (2023). Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis. *Geoderma*, 437, 116591. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116591>

Wilhelm, R. C., Amsili, J. P., Kurtz, K. S., van Es, H. M., & Buckley, D. H. (2023). Ecological insights into soil health according to the genomic traits and environment-wide associations of bacteria in agricultural soils. *Isme Communications*, 3(1), 35. <https://doi.org/10.1038/s43705-023-00236-6>

Wu, X., Cui, Z., Peng, J., Zhang, F., & Liesack, W. (2022a). Genome-resolved metagenomics identifies the particular genetic traits of phosphate-solubilizing bacteria in agricultural soil. *Isme Communications*, 2(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s43705-022-00100-z>

Wu, X., Rensing, C., Han, D., Xiao, K. Q., Dai, Y., Tang, Z., ... & Zhang, F. (2022b). Genome-resolved metagenomics reveals distinct phosphorus acquisition strategies between soil microbiomes. *Msystems*, 7(1), e01107-21. <https://doi.org/10.1128/msystems.01107-21>

Xie, A., Zhou, Q., Fu, L., Zhan, L., & Wu, W. (2024). From Lab to Field: Advancements and Applications of On-the-Go Soil Sensors for Real-Time Monitoring. *Eurasian Soil Science*, 57(10), 1730-1745. <https://doi.org/10.1134/S1064229324601124>

Yadav, I. C., & Devi, N. L. (2017). Pesticides classification and its impact on human and environment. *Environmental Science and Engineering*, 6(7), 140-158.

Zapata-Hernández, R. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Cali, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. ISBN 958-33-6712-5.

Zhang, C., Qiu, M., Wang, J., & Liu, Y. (2023). Recent advances in nanoparticle-based optical sensors for detection of pesticide residues in soil. *Biosensors*, 13(4), 415. <https://doi.org/10.3390/bios13040415>

Zhao, X., Li, X., Li, Y., Zhang, X., Zhai, F., Ren, T., & Li, Y. (2021). Metagenomic analysis reveals functional genes in soil microbial electrochemical removal of tetracycline. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124880. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124880>

Zheng, X., Jahn, M. T., Sun, M., Friman, V. P., Balcazar, J. L., Wang, J., ... & Zhu, Y. G. (2022). Organochlorine contamination enriches virus-encoded metabolism and pesticide degradation associated auxiliary genes in soil microbiomes. *The ISME Journal*, 16(5), 1397-1408. <https://doi.org/10.1038/s41396-022-01188-w>

Zheng, X., Wei, L., Lv, W., Zhang, H., Zhang, Y., Zhang, H., ... & Zhang, W. (2024). Long-term bioorganic and organic fertilization improved soil quality and multifunctionality under continuous cropping in watermelon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 359, 108721. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2023.108721>