

Emerging technologies in biosensors for pesticide monitoring in agri-food systems: systematic review and quantitative analysis of detection limits

Obregon-Tinoco, Henry Mg¹, Jáuregui-Nongrados, John²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ciencias e Ingeniería, Sección de Ingeniería Industrial, Perú,

²Environmental Engineering, San Ignacio de Loyola University, La Molina, Lima, Perú,
hobregon@pucp.edu.pe, jjaurequi@usil.edu.pe

Abstract—the intensive use of pesticides in modern agriculture has increased concerns about food safety and environmental contamination, driving the development of rapid and portable analytical tools. Although conventional chromatographic techniques offer high accuracy, their application in the field is limited. In this context, biosensors have emerged as promising alternatives for in situ pesticide residue monitoring.

This paper presents a systematic review of 41 studies published between 2020 and 2026, selected using the PRISMA methodology. Platforms based on enzyme inhibition, nanozymes, molecularly imprinted polymers (MIPs), aptasensors and immunosensors, whole-cell systems, and portable point-of-care devices were analyzed. A quantitative analysis of the limit of detection (LOD) was performed using the geometric mean due to the log-normal distribution of the data.

The results show that MIPs exhibit the highest average sensitivity (10^{-10} M), followed by enzymatic biosensors and aptasensors (10^{-8} M), while nanozymes and portable platforms reach 10^{-7} M and whole-cell systems 10^{-6} M. These findings demonstrate a transition toward hybrid, sensitive, and digitally integrated biosensors geared toward real-world agricultural applications.

Keywords— Biosensors; Pesticides; LOD; Agri-food safety; Point-of-care.

Tecnologías emergentes en biosensores para el monitoreo de pesticidas en sistemas agroalimentarios: revisión sistemática y análisis cuantitativo del límite de detección

Obregon-Tinoco, Henry Mg¹, Jauregui-Nongrados, John²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ciencias e Ingeniería, Sección de Ingeniería Industrial, Perú,

²Environmental Engineering, San Ignacio de Loyola University, La Molina 15024, Lima, Perú,
hobregon@pucp.edu.pe, jjjauregui@usil.edu.pe

Resumen— El uso intensivo de pesticidas en la agricultura moderna ha incrementado las preocupaciones sobre inocuidad alimentaria y contaminación ambiental, impulsando el desarrollo de herramientas analíticas rápidas y portátiles. Aunque las técnicas cromatográficas convencionales ofrecen alta precisión, su aplicación en campo es limitada. En este contexto, los biosensores han emergido como alternativas prometedoras para el monitoreo in situ de residuos de pesticidas.

Este trabajo presenta una revisión sistemática de 41 estudios publicados entre 2020 y 2026, seleccionados mediante la metodología PRISMA. Se analizaron plataformas basadas en inhibición enzimática, nanozimas, polímeros molecularmente impresos (MIP), aptasensores e inmunosensores, sistemas whole-cell y dispositivos portátiles point-of-care. Se realizó un análisis cuantitativo del límite de detección (LOD) utilizando la media geométrica debido a la distribución log-normal de los datos.

Los resultados muestran que los MIP presentan la mayor sensibilidad promedio (10^{-10} M), seguidos por biosensores enzimáticos y aptasensores (10^{-8} M), mientras que nanozimas y plataformas portátiles alcanzan 10^{-7} M y los sistemas whole-cell 10^{-6} M. Estos hallazgos evidencian una transición hacia biosensores híbridos, sensibles y digitalmente integrados, orientados a aplicaciones agrícolas reales.

Palabras clave— Biosensores; Pesticidas; LOD; Seguridad agroalimentaria; Point-of-care.

I. INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de pesticidas en la agricultura moderna es una práctica fundamental para garantizar la productividad de los cultivos y la seguridad alimentaria global; sin embargo, también ha incrementado de manera significativa las preocupaciones relacionadas con la inocuidad de los alimentos, la contaminación ambiental y la exposición humana [1], [2]. Residuos de herbicidas e insecticidas han sido reportados de forma recurrente en productos agroalimentarios, suelos y cuerpos de agua, mientras que la exposición ocupacional de trabajadores agrícolas representa un riesgo adicional que requiere sistemas de monitoreo eficientes y oportunos [3].

Las técnicas analíticas convencionales, como la cromatografía de gases y líquidos acoplada a espectrometría de masas, continúan siendo los métodos de referencia para la determinación de pesticidas debido a su alta sensibilidad y selectividad. No obstante, su dependencia de instrumentación costosa, personal altamente especializado y procedimientos complejos de preparación de muestras limita su aplicación para el monitoreo in situ y la toma de decisiones en tiempo real. En este contexto, los biosensores han emergido como alternativas prometedoras, ofreciendo simplicidad operativa, tiempos de respuesta rápidos y un alto potencial para aplicaciones portátiles y en campo [4], [5].

Las primeras estrategias de biosensado para la detección de pesticidas se basaron principalmente en mecanismos de inhibición enzimática, particularmente aquellos asociados a la acetilcolinesterasa y enzimas relacionadas, combinadas con transducción electroquímica u óptica [6], [7]. Si bien estos sistemas demostraron una elevada sensibilidad analítica, también presentaron limitaciones importantes en términos de estabilidad, reproducibilidad y susceptibilidad a condiciones ambientales adversas. Para superar estas restricciones, se han incorporado materiales avanzados como nanocarbonos, nanomateriales metálicos y óxidos metálicos, así como estructuras metal-organic frameworks, los cuales han permitido mejorar la transferencia electrónica, amplificar la señal y aumentar la robustez de los dispositivos de biosensado [8]–[10].

Paralelamente, se han explorado estrategias alternativas de reconocimiento molecular con el objetivo de incrementar la selectividad y durabilidad de los biosensores. En *leading this trend*, los polímeros molecularmente impresos han demostrado ser receptores sintéticos eficaces para pesticidas específicos, permitiendo el desarrollo de plataformas libres de enzimas con mayor estabilidad química [11]–[13]. Asimismo, los aptasensores e inmunosensores han ampliado las capacidades de detección selectiva, especialmente cuando se combinan con estrategias avanzadas de amplificación de señal [14], [15].

Más recientemente, los biosensores whole-cell y bioinspirados han ganado relevancia como una alternativa complementaria a los sensores moleculares convencionales. Estos sistemas, basados en bacterias, microalgas y componentes de origen vegetal, aprovechan respuestas biológicas intrínsecas frente a la presencia de pesticidas, lo que permite no solo la detección de residuos, sino también la evaluación de toxicidad biológica y, en algunos casos, la biodegradación activa de los contaminantes [16], [17].

Una tendencia claramente identificada en la literatura reciente es la transición desde biosensores de laboratorio hacia plataformas portátiles, point-of-care e inteligentes. Esta evolución ha sido impulsada por el desarrollo de electrónica flexible, grafeno inducido por láser, hidrogeles, dispositivos basados en papel y sistemas de lectura asistidos por teléfonos inteligentes, lo que ha facilitado la implementación de diagnósticos accesibles y orientados al usuario final [18]–[21]. A diferencia de revisiones previas centradas en principios de detección aislados o clases específicas de pesticidas, el presente trabajo ofrece un análisis integrado que vincula mecanismos de sensado, estrategias de amplificación de señal, portabilidad e inteligencia, proporcionando una visión estructurada del estado actual y las perspectivas futuras del biosensado de pesticidas en sistemas agroalimentarios.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adoptó un enfoque cualitativo, basado en una revisión sistemática de la literatura para analizar el impacto de las herramientas de biosensado en el monitoreo de pesticidas en sistemas agroalimentarios. Se siguieron los lineamientos del modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar la rigurosidad y transparencia en el proceso de selección y análisis de los estudios.

A. Definición del Protocolo de Búsqueda

El protocolo de búsqueda se diseñó utilizando la herramienta PICOC (Población, Intervención, Comparador, Resultado y Contexto), lo que permitió definir criterios claros para la selección de estudios:

- 1) *Población*: Sector agrícola contaminado con pesticidas.
- 2) *Intervención*: Aplicación de biosensores para la detección, identificación o cuantificación de pesticidas
- 3) *Comparación*: Con métodos analíticos convencionales HPLC, LC-MS/MS, espectrofotométricos.
- 4) *Resultado*: Detección rápida de pesticidas.
- 5) *Contexto*: Sistemas de monitoreo agrícola

B. Fuentes de Información

La búsqueda bibliográfica se realizó exclusivamente en la base de datos Scopus, seleccionada por su amplia cobertura de

revistas indexadas de alto impacto en las áreas de biosensores, química analítica, ciencia de materiales y biotecnología. Solo se consideraron artículos científicos revisados por pares publicados en idioma inglés.

La ecuación de búsqueda aplicada en la base de datos Scopus fue la siguiente:

```
(TITLE-ABS-KEY ("biosensor*" OR "electrochemical sensor*" OR "aptamer sensor*" OR "enzyme-based sensor*"))  
AND  
(TITLE-ABS-KEY ("pesticide*" OR "organophosphate*" OR "carbamate*" OR "herbicide*" OR "fungicide*" OR "insecticide*" OR "glyphosate" OR "paraquat" OR "atrazine"))  
AND  
(TITLE-ABS-KEY ("detection" OR "monitoring" OR "quantification" OR "screening"))
```

El uso de truncadores (*) permitió incluir variaciones léxicas de los términos clave, mientras que la combinación de sinónimos mediante operadores OR y la intersección temática mediante AND garantizó una cobertura amplia y específica del campo de estudio.

Asimismo, la búsqueda se limitó a artículos científicos revisados por pares, publicados en idioma inglés durante el periodo 2020–2026, con el fin de asegurar la actualidad y calidad de la evidencia analizada.

C. Criterios de Inclusión y Exclusión

Se establecieron criterios de inclusión y exclusión basados en el enfoque PICOC para delimitar el alcance de la revisión y garantizar la pertinencia metodológica de los estudios seleccionados. La Tabla I presenta los criterios aplicados durante el proceso de selección de artículos.

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Criterio	Inclusión	Exclusión
Tipo de documento	Artículos originales de investigación experimental	Revisiones, editoriales, capítulos, tesis
Tecnología	Estudios que desarrollen o validen biosensores para pesticidas	Métodos exclusivamente cromatográficos sin biosensor
Analito	Pesticidas (organofosforados, carbamatos, herbicidas, fungicidas, insecticidas)	Otros contaminantes (metales, micotoxinas, antibióticos)
Desempeño analítico	Reporte de Limite de detección, sensibilidad, selectividad u otros parámetros cuantitativos	Sin datos cuantitativos de validación
Contexto	Aplicación en matrices agrícolas, alimentarias o ambientales	Aplicaciones exclusivamente clínicas
Periodo e idioma	2020–2026, idioma inglés	Fuera del periodo o sin versión en inglés
Indexación	Revistas indexadas (Scopus / WoS)	Revistas no indexadas

D. Etapas de la Investigación

La investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

- Planteamiento del Problema
- Definición PICOC
- Diseño de estrategia de búsqueda
- Prisma (Identificación-Cribado-Inclusión)
- Extracción y Clasificación de datos
- Resultados y discusiones
- Conclusiones y futuras investigaciones

E. Proceso de Selección

Tras la eliminación de duplicados, los registros fueron evaluados secuencialmente según los criterios establecidos. Como resultado del proceso de selección, se identificaron 41 artículos científicos que cumplieron con todos los criterios de inclusión y conformaron el corpus final de la revisión sistemática. En la Figura 1, se presenta el proceso de selección.

F. Análisis de Datos

La información relevante de los estudios seleccionados fue extraída y organizada de manera sistemática, considerando el tipo de biosensor, el elemento de reconocimiento, el mecanismo de transducción, las estrategias de amplificación de señal y las matrices de aplicación. Posteriormente, los artículos fueron clasificados en categorías temáticas para realizar un análisis comparativo cualitativo orientado a identificar tendencias, avances tecnológicos y desafíos actuales en el biosensado de pesticidas.

Para el análisis cuantitativo del límite de detección (LOD), se empleó la media geométrica debido a la naturaleza de los datos reportados en la literatura, los cuales presentan variaciones de varios órdenes de magnitud. La media geométrica (GM) se calculó mediante la expresión:

$$MG = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (1)$$

o, de manera equivalente, utilizando su transformación logarítmica:

$$MG = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \right] \quad (2)$$

Previo al cálculo, los valores de LOD fueron estandarizados a unidades molares (M) para garantizar la comparabilidad entre estudios. Asimismo, se realizó un análisis exploratorio de dispersión mediante el cálculo del rango y la variabilidad entre estudios dentro de cada categoría tecnológica. Dado el carácter heterogéneo de los estudios incluidos (diferencias en matrices, condiciones experimentales y tipos de biosensores), no se aplicaron pruebas formales de metaanálisis; sin embargo, la dispersión de los datos fue considerada en la interpretación de los resultados,

identificando categorías con mayor variabilidad en el desempeño analítico.

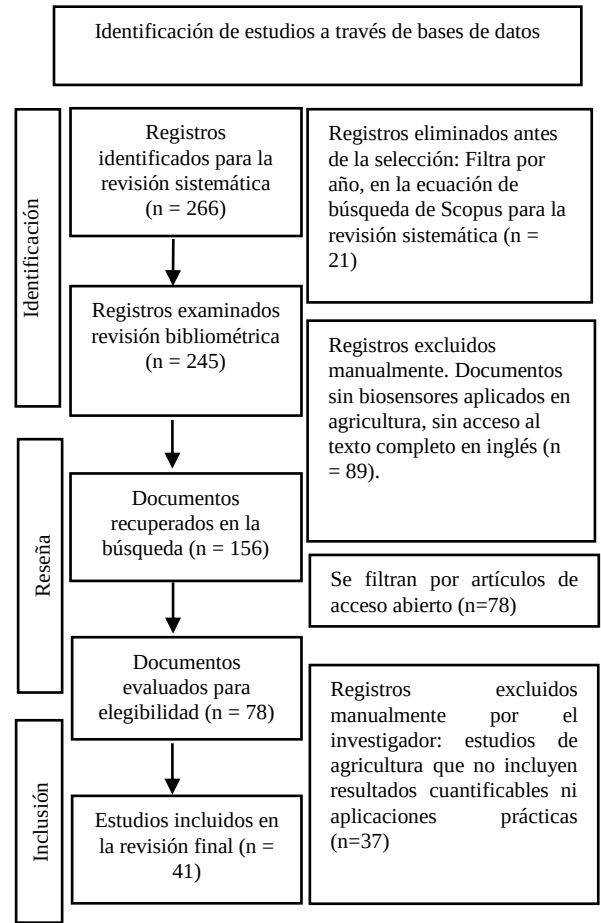


Fig. 1 Diagrama de Flujo de Prisma por etapas

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Panorama general de las plataformas de biosensado para pesticidas

El análisis de los 41 artículos incluidos en esta revisión evidencia una marcada diversificación de las estrategias de biosensado desarrolladas para la detección de pesticidas en sistemas agroalimentarios durante el periodo 2020–2026. Las plataformas electroquímicas constituyen el enfoque predominante, debido a su alta sensibilidad, bajo costo, facilidad de miniaturización y compatibilidad con aplicaciones portátiles [5], [18], [22]. Paralelamente, se identifican avances relevantes en plataformas ópticas, electroquimioluminiscentes (ECL) y fotoelectroquímicas (PEC), las cuales ofrecen ventajas complementarias en términos de selectividad, estabilidad de señal y reducción de interferencias [7], [12], [19], [20]. Los pesticidas más estudiados corresponden a compuestos organofosforados, carbamatos y herbicidas de uso

extendido, tales como glifosato, atrazina y paraquat, reflejando su elevada toxicidad y amplia presencia en matrices agrícolas y ambientales [1], [3], [10], [21]. Asimismo, varios trabajos enfatizan la validación en matrices reales como frutas, vegetales, agua y suelo, lo que refuerza la orientación aplicada del campo [22], [23], [24].

B. Biosensores basados en enzimas y mecanismos de inhibición

Los biosensores enzimáticos, particularmente aquellos fundamentados en la inhibición de la acetilcolinesterasa (AChE), continúan representando una de las estrategias más consolidadas para la detección de pesticidas organofosforados y carbamatos [6], [14], [23], [25]. El mecanismo se basa en la disminución de la actividad catalítica tras la interacción con el analito, generando una señal proporcional a su concentración. El análisis cuantitativo muestra que esta categoría presenta un LOD promedio geométrico del orden de 10^{-8} M, evidenciando alta sensibilidad analítica. Sin embargo, la estabilidad enzimática frente a variaciones de pH, temperatura y matriz sigue siendo una limitación relevante [2], [26], [27]. La incorporación de nanomateriales conductores y arquitecturas tridimensionales ha permitido mejorar la transferencia electrónica y la estabilidad operativa [8], [16], [28], aunque no elimina completamente la susceptibilidad biológica.

C. Estrategias no enzimáticas y uso de nanozimas

Las estrategias no enzimáticas y los sistemas basados en nanozimas emergen como alternativas robustas frente a la fragilidad de las enzimas naturales [4], [22], [29], [30]. Estos sistemas emplean materiales con actividad catalítica tipo peroxidasa u oxidasa, ofreciendo mayor estabilidad térmica y química. El análisis estadístico revela un LOD promedio geométrico del orden de 10^{-7} M, ligeramente superior al de los sistemas enzimáticos, pero con mayor robustez estructural. Las plataformas basadas en hidrogeles y aerogeles nanoestructurados han demostrado buena sensibilidad y aplicabilidad portátil [31], [32]. No obstante, la selectividad depende del diseño morfológico del nanomaterial [10], [17].

D. Polímeros molecularmente impresos (MIP) como receptores sintéticos

Los MIP constituyen una alternativa sintética estable para el reconocimiento selectivo de pesticidas [33], [11], [26], [34]. Estos sistemas combinan estabilidad química con reconocimiento específico mediante cavidades moldeadas. El análisis cuantitativo indica que los MIP alcanzan un LOD promedio geométrico del orden de 10^{-10} M, representando la categoría con mayor sensibilidad promedio dentro del conjunto analizado. Esta alta sensibilidad se asocia a la optimización de nanoarquitecturas y a la eficiencia del reconocimiento sintético.

E. Aptasensores e inmunosensores

Los aptasensores e inmunosensores presentan elevada selectividad molecular gracias al uso de aptámeros o anticuerpos como elementos de reconocimiento [5], [12], [20], [35]. La integración con estrategias de amplificación como ECL, PEC o HCR permite alcanzar límites de detección ultrabajos [36], [37], [38]. El LOD promedio geométrico de esta categoría se sitúa en el orden de 10^{-8} M, aunque con mayor dispersión estadística debido a la diversidad tecnológica. En unidades másicas, esta categoría mostró los valores promedio más bajos, confirmando su alto desempeño analítico.

F. Biosensores whole-cell y plataformas bioinspiradas

Una tendencia transversal identificada es la integración de dispositivos portátiles y herramientas digitales en el diseño de biosensores [16], [21], [30]. Plataformas tipo test strip y sistemas asistidos por smartphone permiten análisis in situ con mínima infraestructura [32]–[39]. El análisis cuantitativo muestra que estas plataformas presentan un LOD promedio geométrico del orden de 10^{-7} M, demostrando que la miniaturización no necesariamente compromete la sensibilidad cuando se integra con nanoingeniería y procesamiento digital. Cabe señalar que un estudio reportó LOD en unidades de copias genómicas por reacción, lo cual no es comparable con unidades químicas de concentración y fue excluido del análisis cuantitativo [1].

G. Portabilidad, point-of-care (POC) e inteligencia en biosensores

Una tendencia transversal identificada en la revisión es la integración de portabilidad y herramientas digitales en el diseño de biosensores [16], [21], [30]. Sistemas tipo test strip, microchips, hidrogeles y plataformas aerogel portátiles han sido combinados con lectura asistida por smartphone y análisis RGB, permitiendo cuantificación precisa sin instrumentación sofisticada [32]–[39]. La incorporación de análisis digital reduce la subjetividad en la interpretación visual y facilita la toma de decisiones en tiempo real. Asimismo, algunos trabajos exploran integración con algoritmos de procesamiento de datos e inteligencia artificial para optimizar la cuantificación y compensar interferencias [13], [38].

H. Análisis comparativo cuantitativo del límite de detección (LOD) entre categorías

Para realizar una comparación objetiva del desempeño analítico entre categorías, se empleó la media geométrica del LOD en unidades molares (M) presentados en la Tabla II. Esta elección se fundamenta en que los valores de LOD presentan una distribución log-normal y varían por múltiples órdenes de magnitud. La media geométrica reduce el sesgo de valores extremos y proporciona una estimación más representativa del desempeño típico de cada grupo.

TABLA II.
LOD PROMEDIO GEOMÉTRICO POR CATEGORÍA (EN UNIDADES MOLARES)

Categoría	n (estudios comparables)	LOD promedio geométrico (M)
A. Enzimas / inhibición	2	1.17×10^{-8}
B. No enzimáticas / nanozimas	2	2.00×10^{-7}
C. MIP	2	4.17×10^{-10}
D. Aptasensores / inmunosensores	5	5.48×10^{-8}
E. Whole-cell / bioinspiradas	4	2.89×10^{-6}
F. Portabilidad / POC / inteligencia	11	1.28×10^{-7}

El análisis evidencia diferencias estructuralmente significativas entre categorías. Los sistemas MIP presentan la mayor sensibilidad promedio, seguidos por plataformas enzimáticas y aptasensores. Las nanozimas y plataformas portátiles mantienen sensibilidad intermedia con mayor estabilidad estructural, mientras que los sistemas whole-cell priorizan aplicabilidad ambiental sobre sensibilidad extrema.

La diferencia entre 10^{-8} M y 10^{-6} M representa dos órdenes de magnitud, lo cual es analíticamente relevante en escenarios de detección de trazas. En conjunto, los resultados confirman que la sensibilidad no depende exclusivamente del reconocimiento biológico, sino del equilibrio entre arquitectura nanoestructurada, mecanismo de transducción y estrategia de amplificación.

I. Limitaciones del estudio

A pesar del rigor metodológico aplicado, el presente estudio presenta algunas limitaciones. En primer lugar, la búsqueda bibliográfica se restringió a la base de datos Scopus, lo que, si bien garantiza la inclusión de literatura de alto impacto, podría haber excluido estudios relevantes indexados en otras bases como Web of Science o PubMed. Asimismo, la heterogeneidad metodológica entre los estudios analizados, en términos de matrices, condiciones experimentales y unidades de reporte, limita la posibilidad de realizar comparaciones directas completamente estandarizadas. Aunque se aplicó la media geométrica para mitigar este efecto, persiste cierta variabilidad inherente en los datos.

Finalmente, la ausencia de estandarización universal en el reporte del LOD y otros parámetros analíticos representa un desafío para la comparación entre tecnologías, lo que resalta la necesidad de protocolos más homogéneos en futuras investigaciones.

IV. CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados evidencian una evolución clara desde biosensores altamente sensibles desarrollados en laboratorio hacia plataformas más equilibradas entre desempeño analítico, robustez y aplicabilidad práctica [5], [16], [35]. La convergencia entre materiales avanzados, estrategias bioinspiradas y herramientas digitales sugiere que

el futuro del biosensado de pesticidas estará dominado por sistemas híbridos, portátiles e inteligentes [37], [30], [38].

No obstante, persisten desafíos relacionados con la estandarización de métricas de desempeño, validación en condiciones reales y aceptación regulatoria, aspectos que deberán abordarse para consolidar la transferencia tecnológica desde el ámbito académico hacia aplicaciones reales en seguridad agroalimentaria y monitoreo ambiental [40], [41].

V. PERSPECTIVAS FUTURAS

El desarrollo de biosensores para detección de pesticidas muestra una transición clara hacia sistemas híbridos que combinan reconocimiento molecular selectivo, nanoingeniería avanzada y plataformas digitales portátiles. Los resultados cuantitativos indican que la sensibilidad extrema puede alcanzarse mediante MIP y aptasensores, mientras que las nanozimas y dispositivos point-of-care ofrecen un equilibrio entre estabilidad y desempeño analítico.

En el futuro, se espera una mayor integración de arquitecturas nanoestructuradas tridimensionales, estrategias de amplificación electroquímica y materiales bidimensionales que permitan reducir aún más los límites de detección sin comprometer la robustez operativa. Asimismo, la incorporación de herramientas digitales e inteligencia artificial facilitará la calibración dinámica y el análisis en tiempo real en entornos agrícolas.

Un desafío clave será la estandarización en el reporte de métricas analíticas, particularmente del LOD y LOQ, para mejorar la comparabilidad entre estudios. Finalmente, el diseño de biosensores sostenibles, de bajo costo y adaptables a condiciones de campo será determinante para su implementación masiva en monitoreo ambiental y seguridad alimentaria.

REFERENCES

- [1] Y. He, J. Du, J. Luo, S. Chen, and R. Yuan, "Coreactant-free electrochemiluminescence biosensor for the determination of organophosphorus pesticides," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 150, Art. no. 111898, 2020, doi:10.1016/j.bios.2019.111898.
- [2] W. Zhang, C. Liu, K. Han, X. Wei, Y. Xu, X. Zou, H. Zhang, and Z. Chen, "A signal on-off ratiometric electrochemical sensor coupled with a molecular imprinted polymer for selective and stable determination of imidacloprid," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 154, Art. no. 112091, 2020, doi:10.1016/j.bios.2020.112091.
- [3] R. Attaallah, A. Antonacci, V. Mazzaracchio, D. Moscone, G. Palleschi, F. Arduini, A. Amine, and V. Scognamiglio, "Carbon black nanoparticles to sense algae oxygen evolution for herbicides detection: Atrazine as a case study," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 159, Art. no. 112203, 2020, doi:10.1016/j.bios.2020.112203.
- [4] L. Montali, M. M. Calabretta, A. Lopreside, M. D'Elia, M. Guardigli, and E. Michelini, "Multienzyme chemiluminescent foldable biosensor for on-site detection of acetylcholinesterase inhibitors," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 162, Art. no. 112232, 2020, doi:10.1016/j.bios.2020.112232.
- [5] M. C. Castrovilli, P. Bolognesi, J. Chiarinelli, L. Avaldi, A. Cartoni, P. Calandra, E. Tempesta, M. T. E. Giardi, A. Antonacci, F. Arduini, and V. Scognamiglio, "Electrospray deposition as a smart technique for laccase immobilisation on carbon black-nanomodified screen-printed electrodes," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 163, Art. no. 112299, 2020, doi:10.1016/j.bios.2020.112299.
- [6] R. Jin, L. Zhao, X. Yan, X. Han, M. Liu, Y. Chen, Q. Li, D. Su, F. Liu, P. Sun, X. Liu, C. Wang, and G. Lu, "Lab in hydrogel portable kit: On-site monitoring of oxalate," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 167, Art. no. 112457, 2020, doi:10.1016/j.bios.2020.112457.
- [7] F. Zhao, J. He, X. Li, Y. Bai, Y. Ying, and J. Ping, "Smart plant-wearable biosensor for in-situ pesticide analysis," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 170, Art. no. 112636, 2020, doi:10.1016/j.bios.2020.112636.
- [8] A. Şenocak, S. O. Tümay, S. M. Makhseed, E. Demirbaş, and M. Durmuş, "A synergetic and sensitive physostigmine pesticide sensor using copper complex of 3D zinc (II) phthalocyanine-SWCNT hybrid material," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 174, Art. no. 112819, 2021, doi:10.1016/j.bios.2020.112819.
- [9] X. Zhu, L. Lin, R. Wu, Y. Zhu, Y. Sheng, P. Nie, P. Liu, L. Xu, and Y. Wen, "Portable wireless intelligent sensing of ultra-trace phyto regulator α -naphthalene acetic acid using self-assembled phosphorene/Ti3C2-MXene nanohybrid with high ambient stability on laser induced porous graphene as nanozyme flexible electrode," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 179, Art. no. 113062, 2021, doi:10.1016/j.bios.2021.113062.
- [10] Y. G. Kotagiri, S. S. Sandhu, H. Teymourian, L. Yin, N. Tostado, F. M. Raushel, S. P. Harvey, L. C. Moores, and J. Wang, "Textile-based wearable solid-contact flexible fluoride sensor: Toward biodetection of G-type nerve agents," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 182, Art. no. 113172, 2021, doi:10.1016/j.bios.2021.113172.
- [11] X. Ruan, Y. Wang, E. Y. Kwon, L. Wang, N. Cheng, X. Niu, S. Ding, B. J. Van-Wie, Y. Lin, and D. Du, "Nanomaterial-enhanced 3D-printed sensor platform for simultaneous detection of atrazine and acetochlor," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 184, Art. no. 113238, 2021, doi:10.1016/j.bios.2021.113238.
- [12] S. Ding, Z. Lyu, S. Li, X. Ruan, M. Fei, Y. Zhou, X. Niu, W. Zhu, D. Du, and Y. Lin, "Molecularly imprinted polypyrrole nanotubes based electrochemical sensor for glyphosate detection," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 191, Art. no. 113434, 2021, doi:10.1016/j.bios.2021.113434.
- [13] J. Huang, Y. Xiang, J. Li, Q. Kong, H. Zhai, R. Xu, F. Yang, X. Sun, and Y. Guo, "A novel electrochemiluminescence aptasensor based on copper-gold bimetallic nanoparticles and its applications," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 194, Art. no. 113601, 2021, doi:10.1016/j.bios.2021.113601.
- [14] S. Lettieri, B. Battaglini, A. Sacco, G. Saracco, and C. Pagliano, "A green and easy-to-assemble electrochemical biosensor based on thylakoid membranes for photosynthetic herbicides detection," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 198, Art. no. 113838, 2022, doi:10.1016/j.bios.2021.113838.
- [15] R. T. Paschoalin, N. O. Gomes, G. F. Almeida, S. Bilatto, C. S. Farinas, S. A. S. Machado, L. H. Mattoso, O. N. de Oliveira Junior, and P. A. Raymundo-Pereira, "Wearable sensors made with solution-blow spinning poly(lactic acid) for non-enzymatic pesticide detection in agriculture and food safety," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 199, Art. no. 113875, 2022, doi:10.1016/j.bios.2021.113875.
- [16] X. Liu, H. Cheng, Y. Zhao, Y. Wang, and F. Li, "Portable electrochemical biosensor based on laser-induced graphene and MnO₂ switch-bridged DNA signal amplification for sensitive detection of pesticide," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 199, Art. no. 113906, 2022, doi:10.1016/j.bios.2021.113906.
- [17] Y. Ye, X. Sun, Y. Zhang, X. Han, and X. Sun, "A novel cell-based electrochemical biosensor based on MnO₂ catalysis for antioxidant activity evaluation of anthocyanins," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 202, Art. no. 113990, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.113990.
- [18] X. Wei, C. Liu, Z. Li, D. Zhang, W. Zhang, Y. Li, J. Shi, X. Wang, X. Zhai, Y. Y. Gong, and X. Zou, "A cell-based electrochemical sensor for assessing immunomodulatory effects by atrazine and its metabolites," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 203, Art. no. 114015, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114015.
- [19] K. Niu, Z. Zuo, X. Lu, L. Zou, and J. Chen, "Ultrathin graphdiyne nanosheets confining Cu quantum dots as robust electrocatalyst for biosensing featuring remarkably enhanced activity and stability," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 205, Art. no. 114111, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114111.
- [20] V. Caratelli, G. Fegatelli, D. Moscone, and F. Arduini, "A paper-based electrochemical device for the detection of pesticides in aerosol phase inspired by nature: A flower-like origami biosensor for precision agriculture," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 205, Art. no. 114119, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114119.
- [21] J. He, X. Zhang, Y. Qian, Q. Wang, and Y. Bai, "An engineered quorum-sensing-based whole-cell biosensor for active degradation of organophosphates," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 206, Art. no. 114085, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114085.
- [22] Y. Dong, R. Chen, L. Wu, X. Wang, F. Jiang, Z. Fan, C. Huang, and Y. Chen, "Magnetic relaxation switching biosensor via polydopamine nanoparticle mediated click chemistry for detection of chlorpyrifos," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 207, Art. no. 114127, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114127.
- [23] H. Zhu, L. Xu, P. Hu, B. Liu, M. Wang, X. Yin, J. Pan, and X. Niu, "Smartphone-assisted bioenzyme-nanozyme-chromogen all-in-one test strip with enhanced cascade signal amplification for convenient paraoxon sensing," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 215, Art. no. 114583, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114583.
- [24] B. Du, H. Lu, Z. Zhang, Y. Wang, X. Hu, Q. Chen, M. Song, and M. Liu, "Self-powered aptasensor for picomole level pollutants based on a novel enzyme-free photofuel cell," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 216, Art. no. 114661, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114661.
- [25] H. Bai, G. Wen, A. Liang, and Z. Jiang, "Ti₃C₂@Pd nanocatalytic amplification-polypeptide SERS/RRS/Abs trimode biosensing platform for ultratrace trinitrotoluene," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 217, Art. no. 114743, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114743.
- [26] Y. Ouyang, M. P. O'Hagan, and I. Willner, "Functional catalytic nanoparticles (nanozymes) for sensing," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 218, Art. no. 114768, 2022, doi:10.1016/j.bios.2022.114768.
- [27] P. U. Prayikaputri, S. Park, S. Kim, Y. Yoon, S. Kim, and H. Yang, "Sensitive electrochemical immunosensor via amide hydrolysis by DT-diaphorase combined with five redox-cycling reactions," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 224, Art. no. 115058, 2023, doi:10.1016/j.bios.2022.115058.
- [28] P. Lach, Á. García-Cruz, F. Canfarotta, A. Groves, J. Kalecki, D. Korol, P. Borowicz, K. Nikiforow, M. Cieplak, W. Kutner, S. A. Piletsky, and P. S. Sharma, "Electroactive molecularly imprinted polymer nanoparticles for selective glyphosate determination," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 236, Art. no. 115381, 2023, doi:10.1016/j.bios.2023.115381.

- [29] H. Chen, S. Zhang, T. Chen, W. Yang, M. Su, G. Fu, W. Yi, R. Yuan, S. Xu, and W. Liang, "Ultrasensitive quantitation of Paraquat based on a small molecule-induced dual-cycle amplification strategy," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 240, Art. no. 115640, 2023, doi:10.1016/j.bios.2023.115640.
- [30] Y. Liu, L. Chen, L. Yu, C. Yang, J. Zhu, J. Wang, J. Zheng, F. Wang, G. He, F. Jiang, C. Sun, L. Zheng, and Y. Yang, "Confinement-enhanced microalgal individuals biosensing for digital atrazine assay," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 241, Art. no. 115647, 2023, doi:10.1016/j.bios.2023.115647.
- [31] Z. Qiu, X. Lin, Y. Lei, J. Zhu, R. Sa, and Y. Chen, "Contactless photoelectrochemical biosensors based on hierarchical MXene/Bi₂S₃ nanosheets with the branched hybridization chain reaction," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 243, Art. no. 115764, 2024, doi:10.1016/j.bios.2023.115764.
- [32] Z. Chen, M. Li, W. Chen, J. Zhou, X. Gu, C. Ding, and Y. Huang, "Cascade reaction triggered colorimetric array for identification of organophosphorus pesticides congeners," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 253, Art. no. 116143, 2024, doi:10.1016/j.bios.2024.116143.
- [33] P. Gao, M. Z. Hussain, Z. Zhou, J. Warnan, M. Elsner, and R. A. Fischer, "Zr-based metalloporphyrin MOF probe for electrochemical detection of parathion-methyl," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 261, Art. no. 116515, 2024, doi:10.1016/j.bios.2024.116515.
- [34] Y. He, L. Luo, L. Li, T. You, and X. Chen, "Synergistic signal-amplification effect of silver nanowires and bifunctional monomers on molecularly imprinted electrochemical sensor for diuron analysis," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 262, Art. no. 116570, 2024, doi:10.1016/j.bios.2024.116570.
- [35] Y. Lai, P. C. Lu, and Y. Kung, "Duckweed-based optical biosensor for herbicide toxicity assessment," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 267, Art. no. 116739, 2025, doi:10.1016/j.bios.2024.116739.
- [36] M. M. Hassan, Y. Xu, J. Sayada, M. Zareef, M. Shoaib, X. Chen, H. Li, and Q. Chen, "Progress of machine learning-based biosensors for the monitoring of food safety: A review," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 267, Art. no. 116782, 2025, doi:10.1016/j.bios.2024.116782.
- [37] W. S. Devi, R. Kaur, A. Sharma, S. Thakur, S. K. Mehta, V. Raja, and F. S. Ataya, "Non-enzymatic g-C₃N₄ supported CuO derived-biochar based electrochemical sensors for trace level detection of malathion," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 267, Art. no. 116808, 2025, doi:10.1016/j.bios.2024.116808.
- [38] H. Li, Q. Lin, R. Zou, M. Zhang, X. Liu, H. Ye, C. Sun, and X. Yan, "A DNA tweezer-actuated nanozyme-enzyme hybrid nanoreactor for pesticide detection," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 271, Art. no. 117064, 2025, doi:10.1016/j.bios.2024.117064.
- [39] C. Gu, S. Ji, Z. Chen, W. Yang, Y. Deng, M. Zhao, W. Huang, W. Yang, and W. Xu, "Enrichment-catalytic synergistically enhanced electrochemiluminescence sensors based on IRMOF-3/CdTe for ultrasensitive detection of organophosphorus pesticides," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 279, Art. no. 117398, 2025, doi:10.1016/j.bios.2025.117398.
- [40] B. Ahmed, B. Raut, A. Pauley, J. L. Davidson, S. Yang, and M. S. Verma, "Development of a portable paper-based biosensor for the identification of genetically modified corn (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*)," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 287, Art. no. 117690, 2025, doi:10.1016/j.bios.2025.117690.
- [41] R. Zou, X. Yan, L. Duan, Y. Zeng, Y. Lin, and H. Li, "Precise point-of-care diagnostics of pesticide exposure by portable chip," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 287, Art. no. 117745, 2025, doi:10.1016/j.bios.2025.117745.