

Biointerfaces in sensors and medical devices: challenges, materials, and solutions for biological integration

Biointerfaces en sensores y dispositivos médicos: retos, materiales y soluciones para la integración biológica

Inwang Edet Usoro¹, Robert O. Akhigbe¹, Michael Promise Ogolodom² , Abdullahi Shuaibu³, Emmanuel Emeka Ezugwu⁴, Olunwayemisi Titi Oyegbata¹, Misael Ron⁵, Oluwafemi Oluide Egbeyemi⁶

¹Department of Medical Radiography and Radiation Sciences, College of Medicine, Lead City University, Ibadan, Nigeria.

²Department of Radiography, Faculty of Basic Medical Sciences, Rivers State University, Port Harcourt, Nigeria.

³Department of Medical Radiography, College of Medical Sciences, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria.

⁴Department of Radiography and Radiological Sciences, Faculty of Health Sciences and Technology, Nnamdi Azikiwe University, Nnewi Campus, Anambra State, Nigeria.

⁵Industrial Engineer, Specialist in Occupational Health and Hygiene of the work Environment, Specialist in Strategic Management, Doctoral Candidate in Public Health. University of Carabobo, Venezuela.

⁶City Gate Health Diagnostic Services, Ogun State, Nigeria

Cite as

Edet Usoro I, Akhigbe RO, Promise Ogolodom M, Shuaibu A, Emeka Ezugwu E, Titi Oyegbata O, et al. Biointerfaces in sensors and medical devices: challenges, materials, and solutions for biological integration. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2025; 4:256. <https://doi.org/10.56294/evk2025256>

Publication History

Submitted: 20-10-2024

Revised: 12-02-2025

Accepted: 22-07-2025

Published: 23-07-2025

Corresponding Author

Michael Promise Ogolodom 

ABSTRACT

Biointerfaces are strategic components in the design of medical sensors and devices, enabling functional interaction between electronic systems and biological tissues. This article examines their properties, materials, and clinical applications, with a focus on biocompatibility, cellular adhesion, electrical conductivity, and structural stability. Current approaches based on conductive hydrogels, nanocomposites with metal oxides, and intelligent coatings are reviewed, as well as their implications in implantable, wearable, microfluidic, and neural interface technologies. The study also addresses critical challenges such as miniaturization, immune response, and the integration of dynamic, stimulus-activated functions. It concludes that biointerfaces represent a key pathway toward the development of more precise, adaptive, and sustainable medical technologies, whose advancement will depend on interdisciplinary convergence among biomedical engineering, materials science, and emerging clinical needs.

Keywords: Biointerfaces; Medical Devices; Biocompatibility; Implantable Sensors.

RESUMEN

Las biointerfaces constituyen un componente estratégico en el diseño de sensores y dispositivos médicos, al permitir la interacción funcional entre sistemas electrónicos y tejidos biológicos. Este artículo analiza las propiedades, materiales y aplicaciones clínicas de estas superficies, con énfasis en la biocompatibilidad, la adhesión celular, la conductividad eléctrica y la estabilidad estructural. Se revisan enfoques actuales basados en hidrogeles conductores, nanocompuestos con óxidos metálicos y recubrimientos inteligentes, así como sus implicaciones en tecnologías implantables, portátiles, microfluídicas y neurointerfaces. También se abordan desafíos críticos como la miniaturización, la respuesta inmunológica y la integración de funciones dinámicas activadas por estímulos. El estudio concluye que las biointerfaces representan una vía clave para el desarrollo de tecnologías médicas más precisas, adaptativas y sostenibles, cuyo avance dependerá de la convergencia interdisciplinaria entre la ingeniería biomédica, la ciencia de materiales y las necesidades clínicas emergentes.

Palabras clave: Biointerfaces; Dispositivos Médicos; Biocompatibilidad; Sensores Implantables.

INTRODUCCIÓN

Las biointerfaces constituyen un componente fundamental en la arquitectura funcional de los biosensores, al representar la zona de contacto directo entre el dispositivo y el entorno biológico con el que interactúa. Ellas actúan como mediadoras de las interacciones moleculares que posibilitan el reconocimiento específico de biomoléculas tales como proteínas, ácidos nucleicos, enzimas o células, de ahí su relevancia en los procesos de detección y diagnóstico.⁽¹⁾

Desde un punto de vista técnico, las propiedades físicas y químicas de la biointerfaz inciden de forma decisiva en parámetros clave de rendimiento, entre los que destacan la selectividad, la sensibilidad, el rango de detección y la estabilidad de la señal en el tiempo. Por consiguiente, el estudio detallado y el diseño racional de esta interfaz se consideran aspectos estratégicos en la proyección y desarrollo de biosensores de nueva generación, los cuales se orientan a aplicaciones clínicas y diagnósticas de alta precisión, respondiendo así a las demandas actuales de la biomedicina.⁽¹⁾

La optimización funcional de una biointerfaz requiere ejercer un control preciso sobre la naturaleza y especificidad de las interacciones que tienen lugar en su superficie, aspecto que resulta determinante para garantizar el desempeño integral del sistema. Para tales fines, se recurre al empleo de materiales avanzados, entre los que destacan, de manera particular, las superficies funcionalizadas con compuestos tales como el oro, capaces de facilitar una inmovilización selectiva de las moléculas objetivo sin comprometer la integridad estructural del dispositivo. Este enfoque posibilita no solo perfeccionar la eficiencia del reconocimiento bioquímico, sino también minimizar interferencias externas, reducir el ruido de fondo y elevar de forma significativa la relación señal/ruido. De esta forma, la biointerfaz deja de asumirse como una simple capa pasiva y se concibe como un componente activo del sensor, esencial para garantizar la fidelidad y precisión de la respuesta analítica ante estímulos biológicos de naturaleza compleja.^(1,2)

En aplicaciones biomédicas implantables, la biointerfaz desempeña un rol aún más crítico, toda vez que debe mantener una interacción constante y biocompatible con los tejidos internos del organismo receptor. Tras su inserción, esta superficie no solo asegura la integración física del sensor con el entorno biológico inmediato, sino que además contribuye a prevenir respuestas adversas tales como la inflamación, la fibrosis o el rechazo inmunológico, que podrían comprometer la funcionalidad del implante. En este sentido, la calidad de la biointerfaz condiciona de forma directa tanto la aceptación del implante como la durabilidad operativa del dispositivo, aspectos que repercuten de manera significativa en la eficacia terapéutica y en la estabilidad del monitoreo clínico a largo plazo. Diseñar biointerfaces que garanticen esta compatibilidad estructural y funcional deviene, por tanto, un requisito esencial para la proyección y desarrollo de tecnologías médicas que resulten seguras y eficaces para el paciente.^(1,3)

En el marco de los avances recientes en tecnologías de interacción biológica, las biointerfaces han cobrado una especial relevancia en el diseño de dispositivos portátiles e implantables, particularmente aquellos vinculados a plataformas de integración entre el ser humano y las máquinas. En este contexto, los hidrogeles se perfilan como materiales privilegiados por su notable capacidad para establecer una unión suave, adaptable y electroconductiva entre los tejidos vivos y los sistemas electrónicos integrados. Gracias a su estructura multifuncional, estos materiales posibilitan no solo una transmisión precisa y continua de señales fisiológicas, sino que además contribuyen a reducir el riesgo de irritación local y a prolongar la vida útil del dispositivo implantado o portátil. Su incorporación en sensores biomédicos de carácter avanzado responde a la necesidad de desarrollar sistemas dinámicos y responsivos, capaces de mantener un desempeño funcional sostenido en entornos biológicos complejos y variables.^(4,5,6)

En consecuencia, resulta imprescindible profundizar en el análisis de las biointerfaces como componentes estratégicos para el diseño y funcionamiento de sensores y dispositivos médicos de última generación, en tanto su influencia directa incide sobre la eficiencia del reconocimiento biológico, la estabilidad operativa de los sistemas y la biocompatibilidad con el entorno fisiológico.^(7,8) La progresiva integración de estas interfaces en plataformas vestibles, implantables y en sistemas de monitoreo continuo en tiempo real, demanda una revisión crítica y permanente de los enfoques materiales, funcionales y tecnológicos que respaldan su desarrollo. Comprender la lógica operativa, los desafíos de acoplamiento y las perspectivas de innovación vinculadas a las biointerfaces permite robustecer la relación entre la ingeniería biomédica y las ciencias de la vida, al tiempo que contribuye a delinear nuevas rutas para la creación de soluciones sanitarias más precisas, seguras y adaptables al cuerpo humano.⁽⁹⁾ Por ello, el presente artículo tiene como propósito examinar los enfoques actuales y las principales aplicaciones de las biointerfaces en sensores y dispositivos médicos, poniendo énfasis en los avances recientes, la selección de materiales con alta compatibilidad biológica y los retos funcionales que enfrentan estos sistemas en contextos clínicos, vestibles e implantables.

MÉTODO

Este trabajo se fundamenta en una revisión bibliográfica dirigida a sistematizar los enfoques actuales, los materiales empleados y los desafíos funcionales vinculados al diseño de biointerfaces en sensores y dispositivos médicos. Para ello, se realizó una estrategia de búsqueda estructurada entre los meses de marzo y junio de 2025, utilizando como principales fuentes las bases de datos académicas Scopus, PubMed, ScienceDirect, MDPI, ACS Publications, SpringerLink, así como el metabuscador Google Scholar, por su amplia cobertura de literatura científica indexada y de acceso abierto.

Las búsquedas se efectuaron empleando combinaciones de palabras clave en inglés tales como *biointerfaces*, *implantable sensors*, *biocompatibility*, *conductive hydrogels*, *smart coatings*, *neural interfaces* y *medical devices*. Se aplicaron filtros por año de publicación (2021–2025) y por tipo de documento (artículos revisados por pares con resultados experimentales o análisis técnicos). En total, se seleccionaron 48 artículos científicos, los cuales fueron organizados temáticamente y analizados en función de su aporte al estudio de las propiedades, aplicaciones clínicas y soluciones tecnológicas en el campo de las biointerfaces. Este proceso permitió identificar patrones comunes, evaluar tendencias emergentes y delimitar con precisión las principales líneas de desarrollo en esta área de investigación biomédica.

DESARROLLO

Entre los materiales empleados en la fabricación de biointerfaces destinadas a sensores y dispositivos médicos, los hidrogeles conductores sobresalen por su notable capacidad para combinar propiedades eléctricas con un elevado nivel de biocompatibilidad. Estos geles de estructura tridimensional exhiben una arquitectura interna que no solo favorece la conducción eficiente de señales eléctricas, sino que además reproduce de forma precisa las características físicas, químicas y biológicas propias del tejido nativo. Dicha capacidad mimética posibilita que actúen como entornos propicios para el crecimiento celular, al proporcionar estabilidad estructural y condiciones ambientales adecuadas para la interacción sostenida con sistemas biológicos complejos.^(10,11)

Asimismo, su estructura porosa los convierte en sustratos altamente eficaces para la liberación controlada de moléculas bioactivas, aspecto que amplía de manera significativa su aplicabilidad en contextos tanto terapéuticos como diagnósticos. La posibilidad de personalizar sus propiedades en función de los requerimientos específicos de cada aplicación biomédica refuerza su rol como componentes estratégicos dentro de las biointerfaces, al posibilitar una integración precisa y sostenida entre el sensor y el entorno fisiológico circundante.^(10,12,13)

Otro enfoque de especial relevancia en la ingeniería de biointerfaces lo constituye la utilización de nanocompuestos que integran polímeros conductores con óxidos metálicos, materiales que exhiben propiedades electrónicas mejoradas y una elevada reactividad superficial. En este sentido, el estudio realizado por Badry et al.⁽¹⁴⁾ demuestra que la incorporación de óxidos como el óxido de magnesio (MgO) y el óxido de manganeso II (MnO) en la estructura de polianilina incrementa de forma significativa parámetros clave tales como el momento dipolar total, el gap de banda y diversos descriptores de reactividad molecular.^(14,15,16)

Estas mejoras se traducen en una mayor capacidad del material para transportar carga de forma estable, aspecto que resulta particularmente ventajoso en contextos donde se demanda una señal precisa y sostenida, como es el caso de los sensores médicos implantables. Asimismo, la elevada correspondencia observada entre los resultados experimentales y los cálculos espectroscópicos refuerza la fiabilidad del comportamiento electrónico de estos nanocompuestos, consolidando su potencial como elementos funcionales en sistemas biomédicos avanzados.⁽¹⁷⁾ Así, la funcionalización de polímeros conductores mediante óxidos metálicos no solo incrementa significativamente el desempeño electroquímico en la interfase, sino que además favorece una integración más armónica con sistemas biológicos complejos, lo cual amplía de forma sustancial su aplicabilidad en el desarrollo de biointerfaces con elevada sensibilidad y prolongada durabilidad.^(14,18,19)

Dentro del ámbito de los sensores implantables, las biointerfaces han experimentado una evolución sostenida hacia soluciones progresivamente más blandas, flexibles y adaptativas al entorno fisiológico, en respuesta a la imperiosa necesidad de reducir la respuesta inmune y asegurar una interacción estable y prolongada con el tejido. En este escenario, los nanocompuestos basados en hidrogeles adquieren una relevancia particular, dada su elevada proporción de agua, su biocompatibilidad intrínseca y su notable capacidad para replicar la textura y elasticidad propias del tejido vivo. Estos materiales, resultantes de la integración entre matrices elastoméricas y nanocargadores funcionales, posibilitan un contacto íntimo y sostenido entre los bioelectrodos y las estructuras orgánicas, facilitando así la captura de datos fisiológicos de alta resolución en tiempo real. A ello se suma su potencial de funcionalización, que habilita una plataforma versátil para el diseño de sistemas bioelectrónicos implantables con propiedades adaptativas, condición indispensable para la monitorización prolongada de funciones biológicas sin inducir daño estructural ni alterar el equilibrio homeostático del entorno tisular.^(20,21)

De manera paralela, los sensores portátiles y los dispositivos microfluídicos han consolidado progresivamente su presencia tanto en el ámbito clínico como en el sector del bienestar personal, gracias a su naturaleza no invasiva y a la capacidad de proporcionar monitoreo fisiológico en tiempo real. Estas tecnologías se integran en una diversidad de formatos que abarca desde accesorios inteligentes y prendas funcionales hasta parches corporales de alta sensibilidad, todos concebidos con el objetivo de mantener un contacto continuo con la superficie cutánea sin comprometer, en ningún momento, la comodidad del usuario.^(22,23)

En este contexto, las biointerfaces asumen un rol fundamental al asegurar una transmisión estable de señales bioeléctricas, al tiempo que se adaptan de forma flexible a los movimientos corporales, preservando así la integridad funcional del sistema. Paralelamente, los dispositivos microfluídicos integran canales de escala micrométrica capaces de manipular volúmenes ínfimos de fluidos biológicos, lo que posibilita la realización de análisis rápidos y precisos en plataformas compactas. Esta convergencia entre portabilidad, alta sensibilidad y compatibilidad con la superficie biológica sitúa a las biointerfaces como componentes esenciales para garantizar la eficiencia funcional de dichos sistemas.^(22,23,24)

Uno de los aspectos funcionales más significativos en el diseño de biointerfaces radica en su capacidad para favorecer una adhesión celular eficiente, condición imprescindible para asegurar la integración efectiva del sensor con los tejidos biológicos. En este sentido, Nguyen et al.⁽²⁵⁾ evidencian que la calidad del contacto establecido entre la superficie del dispositivo y las células incide de forma directa sobre procesos fisiológicos esenciales, tales como la diferenciación, la migración, el ciclo celular y la supervivencia. Si bien la reproducción de las condiciones bioquímicas propias de la matriz extracelular continúa representando un desafío técnico considerable, constituye un requisito clave para el desarrollo de una interfase biológicamente activa, funcional y duradera.^(25,26)

Los materiales biointerfaciales que permiten este tipo de interacción no solo favorecen la comunicación celular, sino que también contribuyen a la durabilidad funcional del sensor una vez implantado. De este modo, la adhesión celular deja de ser un fenómeno secundario y se convierte en un parámetro estructural clave para el éxito de las aplicaciones biomédicas basadas en sensores y tejidos electrónicos blandos.^(25,27,28)

Además de facilitar la adhesión biológica, las biointerfaces deben cumplir con otras funciones críticas, como la biocompatibilidad, la conductividad eléctrica y la capacidad de detección molecular. Un ejemplo representativo lo constituye el polidimetilsiloxano (PDMS), ampliamente empleado en sensores implantables y dispositivos BioMEMS, debido a su baja citotoxicidad, su transparencia

óptica y su adaptabilidad a diversas configuraciones estructurales. Este material, al ser modificado superficialmente, mejora de manera significativa su interacción con las células, permitiendo un contacto estable sin inducir respuestas inflamatorias. Asimismo, el PDMS puede ser combinado con distintos materiales conductores, entre los que se incluyen nanopartículas metálicas, nanomateriales basados en carbono y polímeros con propiedades eléctricas, lo que expande sus funcionalidades sin comprometer su flexibilidad mecánica. Esta notable versatilidad lo posiciona como un componente idóneo para biointerfaces que exigen, de forma simultánea, compatibilidad biológica, integración estructural efectiva y transmisión eficiente de señales eléctricas.^(29,30)

En el contexto de la monitorización continua de glucosa, las biointerfaces desempeñan un rol fundamental al posibilitar una interacción eficiente y estable entre el sensor y el entorno cutáneo o subcutáneo del paciente. En la actualidad, se emplean tanto sensores transcutáneos como versiones implantables de larga duración, capaces de transmitir lecturas en tiempo real a plataformas móviles. En ambas modalidades, la calidad de la biointerfaz constituye un determinante clave para la precisión de la señal, la adherencia sostenida del dispositivo y la tolerancia del paciente frente a un uso prolongado. Sin embargo, estos sistemas aún enfrentan retos significativos vinculados con la miniaturización de los componentes, la variabilidad en la exactitud de las mediciones, el retardo temporal en la detección y la aparición de reacciones cutáneas, especialmente en individuos con hipersensibilidad a los adhesivos. Tales limitaciones evidencian la necesidad imperiosa de desarrollar interfaces más estables y biocompatibles, capaces de mantener un contacto funcional prolongado sin comprometer la integridad tisular ni afectar la comodidad del usuario.^(31,32)

De acuerdo con Yildiz⁽³³⁾, las prótesis retinianas fabricadas con puntos cuánticos de antimonio de aluminio (AlSb) y sulfuro de plomo (PbS), a pesar de su eficiencia en la conducción de carga eléctrica, provocan gliosis reactiva y daño estructural en la región subretinal implantada. Estos efectos adversos evidencian la complejidad de lograr una integración funcional sin desencadenar procesos inflamatorios o degenerativos en tejidos altamente sensibles como la retina. De ahí que uno de los desafíos centrales en este tipo de aplicaciones sea alcanzar un equilibrio adecuado entre miniaturización, capacidad de estimulación y compatibilidad inmunológica, lo cual requiere de desarrollos adicionales en materiales y estrategias de interfase que prioricen la seguridad tisular a largo plazo.^(33,34,35)

En el desarrollo reciente de biointerfaces para dispositivos médicos, los recubrimientos activos al infrarrojo cercano han emergido como una solución multifuncional con alto potencial clínico. Estos recubrimientos permiten incorporar funciones avanzadas como la monitorización no invasiva, la liberación controlada de fármacos y la prevención de infecciones mediante la desintegración de biopelículas, todo ello sin comprometer la biocompatibilidad del dispositivo. Su capacidad para ser activados de forma remota mediante estímulos lumínicos convierte a estas superficies en interfaces activas, capaces de modificar su comportamiento en tiempo real según las necesidades fisiológicas del entorno.^(36,37) De igual forma, se ha demostrado que la combinación de propiedades como actividad antimicrobiana, resistencia al desgaste y funcionalización superficial puede integrarse en una sola etapa de fabricación, optimizando así la eficiencia del proceso y reduciendo la complejidad del ensamblaje clínico. Estos avances posicionan a los recubrimientos NIR como elementos clave para la próxima generación de biointerfaces adaptativas y dinámicas en el campo médico.^(38,39,40,41)

Por otra parte, los recubrimientos inteligentes representan una clase de interfaces funcionales capaces de responder activamente a estímulos ambientales, lo que amplía significativamente su aplicabilidad en dispositivos biomédicos. Diseñados para detectar condiciones específicas como humedad, presencia bacteriana o daño estructural, estos recubrimientos ajustan sus propiedades en tiempo real, mejorando tanto la durabilidad del dispositivo como su desempeño clínico. En particular, ciertos polímeros inteligentes han sido diseñados para liberar agentes desinfectantes automáticamente al detectar aumentos de humedad, generando una respuesta bactericida localizada que contribuye al control de infecciones sin intervención externa. Esta funcionalidad adaptable no solo incrementa la seguridad del paciente, sino que también facilita la creación de superficies activas con capacidad de autorregulación, lo cual resulta especialmente valioso en entornos clínicos donde se requieren soluciones autónomas y eficaces para minimizar complicaciones postoperatorias.⁽⁴²⁾

En el desarrollo reciente de biointerfaces para dispositivos médicos, los recubrimientos activos al infrarrojo cercano (NIR) han emergido como una solución multifuncional con alto potencial clínico. Estos recubrimientos permiten incorporar funciones avanzadas como la monitorización no invasiva, la liberación controlada de fármacos y la prevención de infecciones mediante la desintegración de biopelículas, todo ello sin comprometer la biocompatibilidad del dispositivo. Su capacidad para ser activados de forma remota mediante estímulos lumínicos convierte a estas superficies en interfaces activas, capaces de modificar su comportamiento en tiempo real según las necesidades fisiológicas del entorno. De igual forma, se ha demostrado que la combinación de propiedades como actividad antimicrobiana, resistencia al desgaste y funcionalización superficial puede integrarse en una sola etapa de fabricación, optimizando así la eficiencia del proceso y reduciendo la complejidad del ensamblaje clínico. Estos avances posicionan a los recubrimientos NIR como elementos clave para la próxima generación de biointerfaces adaptativas y dinámicas en el campo médico.^(43,44,45)

Por otra parte, los recubrimientos inteligentes representan una clase de interfaces funcionales capaces de responder activamente a estímulos ambientales, lo que amplía significativamente su aplicabilidad en dispositivos biomédicos. Diseñados para detectar condiciones específicas como humedad, presencia bacteriana o daño estructural, estos recubrimientos ajustan sus propiedades en tiempo real, mejorando tanto la durabilidad del dispositivo como su desempeño clínico. En particular, ciertos polímeros inteligentes han sido diseñados para liberar agentes desinfectantes automáticamente al detectar aumentos de humedad, generando una respuesta bactericida localizada que contribuye al control de infecciones sin intervención externa. Esta funcionalidad adaptable no solo incrementa la seguridad del paciente, sino que también facilita la creación de superficies activas con capacidad de autorregulación, lo cual resulta especialmente valioso en entornos clínicos donde se requieren soluciones autónomas y eficaces para minimizar complicaciones postoperatorias.^(46,47,48)

CONCLUSIONES

El presente artículo ha descrito las principales propiedades, aplicaciones clínicas y desafíos tecnológicos asociados al desarrollo de biointerfaces para sensores y dispositivos médicos, abordando su papel en la integración funcional entre sistemas electrónicos y tejidos biológicos. Las biointerfaces emergen como elementos clave para garantizar la biocompatibilidad, la adhesión celular, la estabilidad eléctrica y la precisión en el monitoreo fisiológico, tanto en plataformas implantables como portátiles. Su eficacia dependerá no solo de los avances en materiales inteligentes y estructuras activas, sino también de su capacidad para adaptarse a entornos dinámicos, minimizar respuestas inmunológicas y favorecer una interacción prolongada sin pérdida de funcionalidad. En última instancia, el futuro de estas tecnologías requerirá enfoques interdisciplinarios que integren ingeniería, biología y diseño clínico, orientados a crear soluciones médicas más seguras, personalizadas y sostenibles.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Inwang Edet Usoro, Robert O. Akhigbe, Michael Promise Ogolodom, Abdullahi Shuaibu, Emmanuel Emeka Ezugwu, Olunwayemisi Titi Oyegbata, Misael Ron, Oluwafemi Olumide Egbeyemi.

Redacción – borrador inicial: Inwang Edet Usoro, Robert O. Akhigbe, Michael Promise Ogolodom, Abdullahi Shuaibu, Emmanuel Emeka Ezugwu, Olunwayemisi Titi Oyegbata, Misael Ron, Oluwafemi Olumide Egbeyemi.

Redacción – revision y edición: Inwang Edet Usoro, Robert O. Akhigbe, Michael Promise Ogolodom, Abdullahi Shuaibu, Emmanuel Emeka Ezugwu, Olunwayemisi Titi Oyegbata, Misael Ron, Oluwafemi Olumide Egbeyemi.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Calorenni P, Bella G, Nicolò MS, Sciuto EL, Balli MV, Valenti G, et al. Advanced DNA–Gold Biointerface for PCR-Free Molecular Detection of *Leishmania infantum* 2025. <https://doi.org/10.1002/admi.202400642>.
2. Tran TAH, Vu VT, Huang C-J. Development of Functional Biointerface Using Mixed Zwitterionic Silatranes. *Langmuir* 2024;40:24516-27. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c03302>.
3. Flexible coatings based on hydrogel to enhance the biointerface of biomedical implants. *Adv Colloid Interface Sci* 2025;335:103358. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103358>.
4. Ullah A, Kim DY, Lim SI, Lim H-R. Hydrogel-Based Biointerfaces: Recent Advances, Challenges, and Future Directions in Human-Machine Integration. *Gels Basel Switz* 2025;11:232. <https://doi.org/10.3390/gels11040232>.
5. Li X, Huang X, Yang L, Jung S, Wang J, Zhao H. Implantable physical sensors for in vivo organ monitoring. *Med-X* 2025;3:1. <https://doi.org/10.1007/s44258-024-00047-x>.
6. Martínez DMV, Albóniga BS, Gonzalez CC, Carballea OL, Corrales JLF. Epidemiological characterisation of sedentary patients at the Hermanos Cruz Polyclinic. June 2021 – June 2023. *South Health Policy* 2023;2:70-70. <https://doi.org/10.56294/shp202370>.
7. Molina MA, Durán AG, García HG. Liquid vermicompost as a biostimulant in chili pepper nurseries: Morphophysiological evaluation and impact analysis. *Environ Res Ecotoxicity* 2024;3:112-112. <https://doi.org/10.56294/ere2024112>.
8. Molina MA, Durán AG, García HG. Liquid vermicompost as a biostimulant in chili pepper nurseries: Literature review and experimental justification. *Environ Res Ecotoxicity* 2024;3:113-113. <https://doi.org/10.56294/ere2024113>.
9. Quijandria MÁM. Improvement of municipal income and quality of life through solid waste characterisation in El Distrito, Villa El Salvador. *Environ Res Ecotoxicity* 2022;1:18-18. <https://doi.org/10.56294/ere202218>.
10. Hong Y, Lin Z, Yang Y, Jiang T, Shang J, Luo Z. Biocompatible Conductive Hydrogels: Applications in the Field of Biomedicine. *Int J Mol Sci* 2022;23:4578. <https://doi.org/10.3390/ijms23094578>.
11. Landívar RC, Moreano ALC, Valle VMRD, Chávez-Arizala JF. Risk factors for high blood pressure in older adults of the Provincial Directorate of the MIES of Santo Domingo de los Tsáchilas. *Multidiscip Montev* 2025;3:62-62. <https://doi.org/10.62486/agmu202562>.

12. Ramírez JL, Chica AMG, Intriago NSS, Arizala JFC. Chronic renal failure: Clinical and therapeutic aspects for the approach. *Multidiscip Montev* 2025;3:60-60. <https://doi.org/10.62486/agmu202560>.
13. Cano AMC. Medical Ethics in Terminal Patients: Dilemmas in the Use of AI for End-of-Life Decisions. *EthAIca* 2022;1:22-22. <https://doi.org/10.56294/ai202222>.
14. Badry R, Elhaes H, Ibrahim A, Refaat A, Ibrahim MA. Investigating the electronic properties and reactivity of polyaniline emeraldine base functionalized with metal oxides. *Sci Rep* 2024;14:27024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72435-7>.
15. Zhu L, Othman MSB, Yusuf LBM, Sun X. User Acceptance and Sustainable Adoption of University Management Information Systems: a Cross-cultural Study. *Salud Cienc Tecnol - Ser Conf* 2025;4:1239-1239. <https://doi.org/10.56294/sctconf20251239>.
16. Ngatman N, Salimi M, Ulfiana U, Hidayah R, Wahyudi ABE, Wahyono W, et al. The Implementation of Problem-Based Learning with Multimedia for Improving Scientific Process Skills. *Salud Cienc Tecnol - Ser Conf* 2025;4:1247-1247. <https://doi.org/10.56294/sctconf20251247>.
17. Mat NAC, Salleh SSMM. The effect of board of director diversity on company performance and the mediating role of director remuneration: Malaysia public companies' evidence. *Salud Cienc Tecnol - Ser Conf* 2025;4:1240-1240. <https://doi.org/10.56294/sctconf20251240>.
18. He X, Tan WH. Analysis of the Teaching Effectiveness of Virtual Reality Technology in Higher Education. *Salud Cienc Tecnol - Ser Conf* 2025;4:1274-1274. <https://doi.org/10.56294/sctconf20251274>.
19. G OAA, Rosales A, Silva FD. Application of simulation tools to HAZOP analysis of exothermic reaction processes. *eVidroKhem* 2024;3:102-102. <https://doi.org/10.56294/evk2024102>.
20. Kim S, Shin Y, Han J, Kim HJ, Sunwoo S-H. Introductory Review of Soft Implantable Bioelectronics Using Conductive and Functional Hydrogels and Hydrogel Nanocomposites. *Gels* 2024;10:614. <https://doi.org/10.3390/gels10100614>.
21. Wahed MA, Alqaraleh M, Alzboon MS, Al-Batah MS. AI Rx: Revolutionizing Healthcare Through Intelligence, Innovation, and Ethics. *Semin Med Writ Educ* 2025;4:35-35. <https://doi.org/10.56294/mw202535>.
22. Mukherjee S, Suleman S, Pilloton R, Narang J, Rani K. State of the Art in Smart Portable, Wearable, Ingestible and Implantable Devices for Health Status Monitoring and Disease Management. *Sensors* 2022;22:4228. <https://doi.org/10.3390/s22114228>.
23. Hernández LAR. The pedagogical role of training research seedbeds in the era of artificial intelligence and emerging technologies. *Semin Med Writ Educ* 2025;4:36-36. <https://doi.org/10.56294/mw202536>.
24. Guada L, Dirinó L, Álvarez J, Ron M, Hernández-Runque E. Strategies based on information and communication technologies (ICT), as a didactic tool for the development of the physiotherapy career. *Semin Med Writ Educ* 2025;4:34-34. <https://doi.org/10.56294/mw202534>.
25. Nguyen JVL, Ghafar-Zadeh E. Biointerface Materials for Cellular Adhesion: Recent Progress and Future Prospects. *Actuators* 2020;9:137. <https://doi.org/10.3390/act9040137>.
26. G OAA, Rosales A, Silva FD. Application of a Methodological Framework for the Development of a Hazop Study of a CSTR Reactor for the Production of Propylene Glycol from Propylene Oxide Using Process Simulation in Aspen Hysys. *eVidroKhem* 2024;3:101-101. <https://doi.org/10.56294/evk2024101>.
27. Llerandi JV, Peralta EM, González M del CF, Borrego AP. Environmental factors associated with cleft lip and palate in children treated at the William Soler Hospital. *Salud Cienc Tecnol* 2024;4:772-772. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2024772>.
28. Masó JRH, Ferrer RL. Level of satisfaction with the results of science and technology processes in the context of medical education. *Semin Med Writ Educ* 2025;4:38-38. <https://doi.org/10.56294/mw202538>.
29. Abhinav V, Basu P, Verma SS, Verma J, Das A, Kumari S, et al. Advancements in Wearable and Implantable BioMEMS Devices: Transforming Healthcare Through Technology. *Micromachines* 2025;16:522. <https://doi.org/10.3390/mi16050522>.
30. H M, Sharma A, B JN, Nayak GR, Ashok KS. Innovations in Healthcare Management That Foster Enhanced Patient Safety and Quality of Care. *Health Leadersh Qual Life* 2023;2:292-292. <https://doi.org/10.56294/hl2023292>.

31. Suárez-Ayala DV, Forero-Ronderos C, Coll M, Durán P, Céspedes C. Monitoreo Continuo de Glucosa. ¿Qué evidencia tenemos en pediatría? *Andes Pediatr* 2021;92:617-25. <https://doi.org/10.32641/andespediatr.v92i4.2973>.
32. Fernández N. Architectures of finitude: New biomaterial practices from an ecofeminist perspective. *SCT Proc Interdiscip Insights Innov* 2024;2:290-290. <https://doi.org/10.56294/piii2024290>.
33. Yildiz E. Retinal and neural stimulation with quantum dots based photovoltaic interfaces. 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10126827>.
34. Pera LYP, Ponte AS, García-Huamantumba E, Dávila LV, Castillo-Sáenz RA, Nizama JLR, et al. Use of mobile devices in the promotion of health and well-being in young university students. *Salud Cienc Tecnol* 2023;3:480-480. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2023480>.
35. Ruiz-Sáez P, Velásquez-Oberreuter L, Zúñiga NT, Acevedo ML. Implementation of technological devices used by occupational therapists in upper extremity rehabilitation after a stroke. *Salud Cienc Tecnol* 2023;3:694-694. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2023694>.
36. Guayacundo WC, Mejía NL, García HFL, Rodríguez DTG. Improving cooling rate in a cold room by using a parametric study coupled with computational fluid dynamics. *eVidroKhem* 2025;4:153-153. <https://doi.org/10.56294/evk2025153>.
37. Breto GD, Alvarez YP, Rodríguez FAR. Portable Technologies in Clinical Biochemistry, from the laboratory to the point of care. *eVidroKhem* 2025;4:160-160. <https://doi.org/10.56294/evk2025160>.
38. Lekshmi GS, Prasad K, Alexander K, Kumaravel V. Innovative and sustainable approaches to NIR-active coatings for next-generation medical devices. *Chem Commun* 2025. <https://doi.org/10.1039/D5CC02164B>.
39. Ochoa GFT, Clavijo PEC, Tonato JLM, Guartatanga PGP, Vela MPM, Nuñez FIN, et al. Efficacy of wearable cardiac monitoring devices versus traditional methods in detecting atrial fibrillation: a systematic review and meta-analysis. *Salud Cienc Tecnol* 2024;4:962-962. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2024.962>.
40. García-Huamantumba E, García-Huamantumba CF, Velarde-Dávila L, Villavicencio-Guardia PG, Piñán-García JH, Pastrana-Díaz N del C, et al. Application of mobile reality in the training of health sciences students. *Salud Cienc Tecnol* 2024;4. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2024645>.
41. Valbuena CNA. Tools for AI-driven Development of Research Competencies. *LatIA* 2023;1:16-16. <https://doi.org/10.62486/latia202316>.
42. Chen X, Zheng B, Zhou S, Shi C, Liang Y, Hu L. Development and Application of Intelligent Coating Technology: A Review. *Coatings* 2024;14. <https://doi.org/10.3390/coatings14050597>.
43. Canali S, Schiaffonati V, Aliverti A. Challenges and recommendations for wearable devices in digital health: Data quality, interoperability, health equity, fairness. *PLOS Digit Health* 2022;1:e0000104. <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000104>.
44. Vargas OLT, Buitrago MV. Color in images: a machine vision approach to the measurement of CIEL*a*b* coordinates in bovine loins. *LatIA* 2024;2:103-103. <https://doi.org/10.62486/latia2024103>.
45. Jiménez JRM, Severich RM, Viles EC, Martinez RAO. Design and Development of a Podiatric Station Prototype for the Diagnosis of Diabetic Foot. *eVidroKhem* 2025;4:165-165. <https://doi.org/10.56294/evk2025165>.
46. Zafar S, Nazir M, Bakhshi T, Khattak HA, Khan S, Bilal M, et al. A Systematic Review of Bio-Cyber Interface Technologies and Security Issues for Internet of Bio-Nano Things. *IEEE Access* 2021;9:93529-66. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093442>.
47. Cano AMC. Medical Ethics in Terminal Patients: Dilemmas in the Use of AI for End-of-Life Decisions. *EthAIca* 2022;1:22-22. <https://doi.org/10.56294/ai202222>.
48. Gonzalez-Argote J, Maldonado E, Maldonado K. Algorithmic Bias and Data Justice: ethical challenges in Artificial Intelligence Systems. *EthAIca* 2025; 4:159-159. <https://doi.org/10.56294/ai2025159>.