

Transdigital[®]

revista científica



Volumen 7, número 13: Enero-junio 2026

ISSN: 2683-328X

Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales S. C.

La revista científica *Transdigital* es una publicación semestral bajo el modelo de publicación continua editada por la Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales S.C. Hasta ahora, la revista ha sido indizada en: *Latindex*, *Dialnet*, *ERIHPLUS*, *REDIB*, *EuroPub*, *LivRe*, *AURA*, *Academic Resource Index (ResearchBib)*, *MIAR*, *OpenAire-Explore*, *Refseek*, *Sherpa Romeo*, *Elektronische Zeitschriftenbibliothek*, *ZDB Zeitschriften Datenbank*, *WorldCat*, *Dimensions*, *The University of Liverpool*, *Discovery*, *Erasmus University Rotterdam*, *Mir@bel*, *REBIUN*, *DARDO*, *UOCI*, *LatinRev*, *ROAD*, *Google Scholar*, *Crossref*, *Scite*, *Lens*, *Internet Archive*, *BASE*, *OpenAlex*, *Semantic Scholar* y *ScienceOpen*. Dirección oficial: Circuito Altos Juriquilla 1132. C.P. 76230, Querétaro, México. Tel. +52 (442) 301-3238. Página web oficial: www.revista.transdigital.mx. Correo electrónico: revista@transdigital.mx. Editor en jefe: Alejandro Escudero-Nahón (ORCID: 0000-0001-8245-0838). Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-020912091600-102. International Standard Serial Number (ISSN): 2683-328X; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (México). Responsable de la última actualización: Editor en jefe: Alejandro Escudero-Nahón. Todos los artículos en la revista *Transdigital* están licenciados bajo Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). Usted es libre de: Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente. La persona licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia. Lo anterior, bajo los siguientes términos: Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.



Transdigital[®]

revista científica

ELECTRODOS INTERDIGITADOS:
INNOVACIÓN EN LA DETECCIÓN
Y MONITOREO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS

INTERDIGITATED ELECTRODES:
INNOVATION IN THE DETECTION AND
MONITORING OF BIOLOGICAL SYSTEMS



Mayra Paola Mena-Navarro*
Universidad Autónoma de Querétaro, México
ORCID: 0000-0001-6387-554X



Miguel Ángel Ramos-López
Universidad Autónoma de Querétaro, México
ORCID: 0000-0002-7105-5039



Juan Campos-Guillen
Universidad Autónoma de Querétaro, México
ORCID: 0000-0001-7117-6781



Francisco Javier De Moure-Flores
Universidad Autónoma de Querétaro, México
ORCID: 0000-0002-8010-3573



Claudia Reyes-Betanzo
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica, México
ORCID: 0000-0002-7801-9903



Aldo Amaro-Reyes
Universidad Autónoma de Querétaro, México
ORCID: 0000-0001-6520-5742

Sección: Ensayo de investigación

Autora de correspondencia*

Fecha de recepción: 07/01/2026

Fecha de aceptación: 17/05/2026

ELECTRODOS INTERDIGITADOS: INNOVACIÓN EN LA DETECCIÓN Y MONITOREO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS

INTERDIGITATED ELECTRODES: INNOVATION IN THE DETECTION AND MONITORING OF BIOLOGICAL SYSTEMS

RESUMEN

Los electrodos interdigitados son dispositivos pequeños con una geometría particular. Están formados por dos microelectrodos dispuestos de manera alternada y paralela, separados por distancias micrométricas. Esta disposición permite enviar y recibir señales eléctricas de manera cíclica, lo que los convierte en herramientas útiles para analizar muestras muy pequeñas, como microorganismos u otros componentes biológicos. Por esta razón, se han propuesto como biosensores capaces de detectar distintos fenómenos biológicos, como cambios en la actividad celular o en el estado fisiológico de los organismos. Uno de los más utilizados es la impedancia, que refleja la resistencia al paso de la electricidad en una solución y puede revelar cambios importantes en las células, como aquellos asociados con el estrés oxidativo. Gracias a esta capacidad de monitoreo, estos sensores tienen aplicaciones potenciales en áreas como la salud, la industria alimentaria, la agricultura y el monitoreo ambiental.

Palabras clave: electrodos interdigitados, impedancia, estrés oxidativo, biosensores, señales eléctricas

ABSTRACT

Interdigitated electrodes are small devices with a geometry composed of two microelectrode arrays arranged in an alternating and parallel configuration, with micrometric spacing between them. This arrangement allows electrical signals to be applied and collected in a cyclic manner, making them useful tools for analyzing very small samples, such as microorganisms or other biological components. For this reason, they have been proposed as biosensors capable of detecting various biological phenomena. One of the most widely used is impedance, which reflects the opposition to the flow of electricity in a solution and can reveal important changes in cells, such as those associated with oxidative stress. Due to this monitoring capability, these sensors have potential applications in areas such as healthcare, the food industry, agriculture, and environmental monitoring.

Keywords: interdigitated electrodes, impedance, oxidative stress, biosensors, electrical signals

1. INTRODUCCIÓN

¿Te imaginas una tecnología que evalúe y monitoree sistemas biológicos en tiempo real? En la actualidad, es posible observar cómo diversos sistemas biológicos responden a cambios en su entorno sin necesidad de marcarlos con colorantes o destruirlos para analizarlos. Los electrodos interdigitados son una herramienta que hacen esto posible. Son estructuras metálicas diminutas con forma de dos microelectrodos dispuestos de manera alternada y paralela que funcionan como biosensores eléctricos altamente sensibles. Desde bacterias expuestas a antibióticos hasta células vegetales sometidas a estrés químico, estos dispositivos detectan cambios sutiles en tiempo real mediante propiedades eléctricas como la impedancia o la capacitancia, pero ¿cómo funcionan y por qué son tan útiles en microbiología y biología molecular?

En particular, los biosensores electroquímicos miden cambios en corriente, voltaje o impedancia, lo que los convierte en herramientas muy precisas y eficientes para detectar fenómenos como el estrés oxidativo. Este estrés es causado por la presencia de especies reactivas de oxígeno (ROS). Los ROS son moléculas activas que se forman naturalmente en las células y participan en procesos normales; en exceso pueden dañar otras moléculas y estructuras celulares. Su característica común es que contienen oxígeno y reaccionan fácilmente con su entorno, provocando cambios rápidos en las células. Gracias a su capacidad para detectar estas especies, los biosensores electroquímicos representan una alternativa prometedora para aplicaciones como el monitoreo ambiental, la detección de bacterias patógenas y el seguimiento de enfermedades (Deshpande et al., 2021).

Actualmente, los biosensores se emplean como una herramienta de análisis preliminar, pues obtienen resultados rápidos y generales. Sin embargo, estos resultados requieren confirmación mediante métodos de laboratorio más específicos y robustos. No obstante, los biosensores actuales enfrentan el reto de alcanzar niveles de precisión comparables a los equipos convencionales de laboratorio sin sacrificar su sensibilidad, la cual hoy en día se sitúa entre el 70% y el 80%. Además, deben responder a la creciente demanda de dispositivos portátiles, accesibles y fáciles de usar. Superar estos desafíos permitirá que los biosensores se integren cada vez más en la vida cotidiana, transformando la manera en que monitoreamos y protegemos la salud, la calidad de los alimentos y el ambiente (Hicks et al., 2020).

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1. Características principales de los biosensores

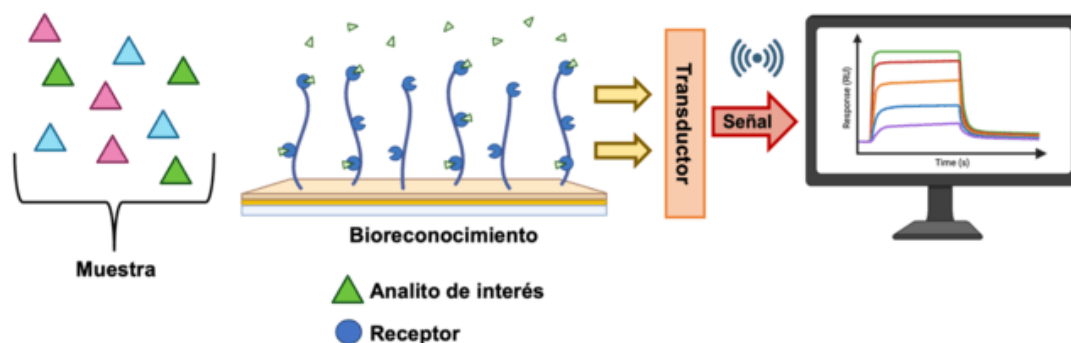
Los biosensores son dispositivos capaces de reconocer señales biológicas. Un ejemplo práctico de los biosensores son los glucómetros, que son reconocidos y utilizados por la mayoría de la población. Estos dispositivos sirven como sensores portátiles que utilizan una enzima (generalmente glucosa oxidasa) en sus tiras reactivas, para medir los niveles de azúcar en la sangre, mediante reacciones electroquímicas. Los biosensores se utilizan en campos tan variados como la agricultura, el monitoreo ambiental, el diagnóstico de enfermedades y la

seguridad alimentaria, solo por mencionar algunos ejemplos. Según su forma de funcionamiento, pueden clasificarse en ópticos, térmicos, electrónicos, gravimétricos y electroquímicos (Mehrotra, 2016).

Los biosensores funcionan gracias a un componente biológico, como enzimas, anticuerpos o incluso células; el cual reconoce de forma específica la sustancia que se quiere detectar. Cuando ocurre este reconocimiento, se produce un pequeño cambio o reacción que genera una señal. Esta señal es captada por un transductor, que la convierte en información que podemos descifrar y cuantificar. De esta manera, los biosensores permiten detectar y analizar distintas sustancias de forma rápida y precisa (Figura 1) (Bonetto et al., 2018).

Figura 1

Esquema de los componentes de un biosensor



Los biosensores representan una alternativa prometedora frente a los métodos de análisis convencionales debido a su sensibilidad, selectividad, confiabilidad, vida útil, bajo costo y rapidez de respuesta (Tabla 1).

Tabla 1

Principales características de los biosensores

Características	Descripción	Referencias
Sensibilidad	La regeneración continua del analito en reacciones cíclicas permite aumentar la sensibilidad del electrodo. Se puede registrar una corriente de hasta 10^{-10} A con ayuda de dispositivos comerciales.	Wollenberger (1996)
Selectividad	Gracias a los elementos presentes en el biosensor, se pueden eliminar perturbaciones de la reacción o del electrodo causadas por componentes de la muestra que no son de interés.	Wollenberger (1996)
Confiabilidad	Es un dispositivo que cuenta con la linealidad que contribuye a la precisión	Naresh y Lee

Tabla 1
Principales características de los biosensores

Características	Descripción	Referencias
	de los resultados medidos.	(2021)
Tiempo de vida	La mejora en materiales y en la inmovilización del biocomponente ha permitido aumentar la vida útil y la estabilidad de señal.	Turner (2013)
Bajo costo	La miniaturización y la producción a gran escala han contribuido a reducir costos en comparación con métodos instrumentales convencionales.	Turner (2013)
Tiempo de análisis	Su capacidad para proporcionar resultados rápidos, facilitando el análisis en tiempo real o cercano al punto de atención. Esta característica los posiciona como alternativa atractivas frente a técnicas de laboratorio que requieren procedimientos más largos y complejos.	Turner (2013)

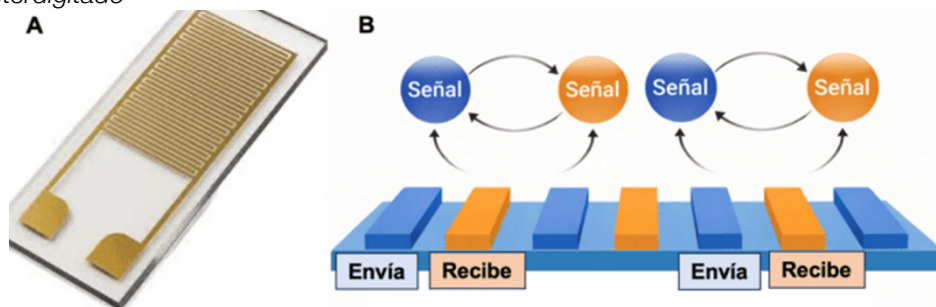
2.2. ¿Qué son los electrodos interdigitados?

Un electrodo interdigitado está formado por dos conjuntos de microelectrodos metálicos dispuestos de forma alternada y paralela (Figura 2). Al aplicar una señal eléctrica entre ambos conjuntos, se genera un campo eléctrico en la superficie del sensor. Cuando células o microorganismos se encuentran sobre esta superficie, modifican ese campo eléctrico. Esas modificaciones se traducen en cambios medibles en parámetros eléctricos. En esencia, el sistema funciona como una balanza invisible que detecta variaciones en: número de células adheridas, integridad de membranas, producción de metabolitos, formación de biopelículas y cambios en la morfología celular (Mazlan et al., 2017).

El electrodo de matriz interdigitada (IDA, por sus siglas en inglés) es un pequeño dispositivo diseñado para estudiar lo que ocurre en una muestra usando cantidades mínimas de líquido. Esto lo hace especialmente valioso cuando la muestra es escasa o difícil de obtener. A simple vista, el IDA parece un patrón formado por muchas líneas muy delgadas colocadas una junto a otra. En realidad, está compuesto por decenas de pequeños pares de electrodos; la cantidad de pares puede variar dependiendo del diseño del electrodo. Cada par trabaja en conjunto: uno *envía* la señal y el otro la *recibe* (Figura 2) (Odiijk et al., 2008).

Figura 2

Electrodo interdigitado



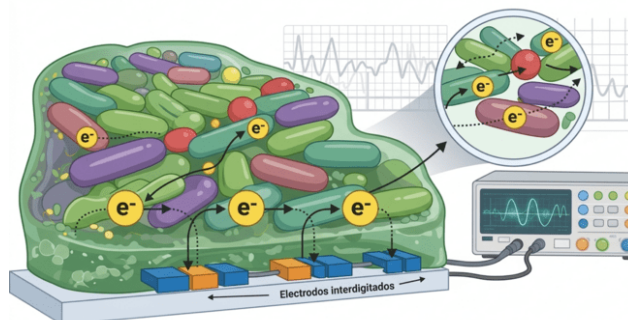
Nota. (A) Imagen de un electrodo interdigitado real, formado por pequeñas líneas metálicas entrelazadas sobre una superficie sólida. (B) Esquema ilustrativo de su funcionamiento: cada par de electrodos trabaja en conjunto, donde uno envía una señal eléctrica y el otro la recibe. Este intercambio ocurre de ida y vuelta de manera continua, lo que permite detectar cambios muy pequeños en la muestra colocada sobre el dispositivo.

Cuando se aplica una señal eléctrica muy suave, se generan pequeños cambios en las sustancias presentes en la muestra. El primer electrodo provoca esa transformación y el segundo la detecta. Este intercambio ocurre de forma repetida, como si la señal viajara de ida y vuelta entre ambos, lo que permite amplificar lo que está sucediendo y hacerlo más fácil de medir. Gracias a este diseño, el IDA puede detectar cambios muy pequeños en la muestra, incluso cuando se trabaja con volúmenes diminutos. Por eso se ha convertido en una herramienta clave para estudiar reacciones químicas, analizar compuestos y desarrollar biosensores capaces de responder a cambios en células y microorganismos. En pocas palabras, es una estructura microscópica que aprovecha la electricidad para revelar procesos invisibles, usando apenas unas gotas de muestra (Odiijk et al., 2008).

Por su alta sensibilidad, los electrodos IDA resultan útiles para estudiar sistemas biológicos complejos. En sistemas vivos, como las biopelículas bacterianas (capas densas con una estructura 3D, que forman los microorganismos sobre una superficie). Este tipo de electrodo permite observar cómo circula la electricidad a través de la comunidad microbiana (Figura 3). Algunas bacterias pueden mover pequeñas cargas eléctricas entre unas y otras, como si estuvieran conectadas por una red interna. Cuando esto ocurre, la biopelícula se vuelve más *conductora*. Es decir, facilita el paso de la electricidad. Ese cambio puede detectarse con claridad usando estos sensores (Zazueta-Gambino et al., 2020).

Figura 3

Representación ilustrada de una biopelícula bacteriana formada sobre un electrodo interdigitado



Nota. Las bacterias, organizadas en una estructura tridimensional, intercambian pequeñas cargas eléctricas entre sí, lo que facilita el paso de la electricidad a través de la comunidad. Estos cambios pueden detectarse mediante señales eléctricas suaves que permiten analizar, sin alterar la muestra, cómo interactúan las bacterias y cómo contribuyen al comportamiento eléctrico del sistema.

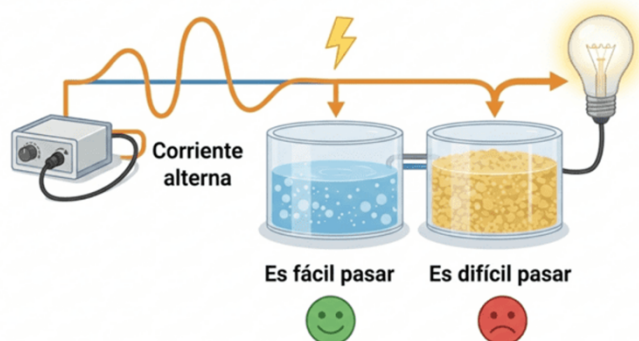
Además, al trabajar con señales eléctricas suaves que cambian constantemente, los electrodos interdigitados permiten analizar la respuesta del sistema con mayor detalle. Esto ayuda a distinguir qué parte de la señal proviene de la biopelícula, cuál se relaciona con el contacto entre las células y el electrodo, y cuál depende del líquido que las rodea. En conjunto, esta herramienta permite entender mejor cómo se organizan y cómo interactúan las bacterias cuando viven en comunidad, sin necesidad de alterar o destruir la muestra (Zazueta-Gambino et al., 2020). Toda esta información se obtiene a partir de cómo el sistema se opone o responde al paso de la corriente eléctrica, una propiedad conocida como impedancia. Analizar estos cambios en la impedancia es precisamente la base de los biosensores de impedancia, que permiten detectar y seguir procesos biológicos en tiempo real.

2.3. Biosensores de impedancia

La impedancia eléctrica es la oposición que ofrece un sistema al paso de una corriente alterna. En términos sencillos, es como medir qué tan difícil es para la electricidad atravesar un medio (Figura 4). Los biosensores de impedancia evalúan cómo se modifica la oposición total al paso de una señal eléctrica cuando ocurre una interacción biológica en el sistema (Grieshaber et al., 2008).

Figura 4

Ilustración conceptual de la impedancia eléctrica



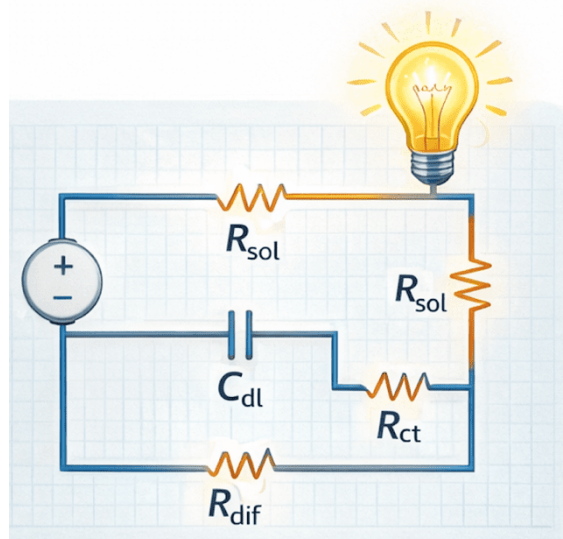
Nota. La corriente alterna intenta atravesar distintos medios: cuando el paso es sencillo, la electricidad fluye con facilidad; cuando encuentra mayor oposición, el flujo se dificulta.

Sin embargo, esta oposición no depende de un solo proceso, sino del efecto combinado de varios fenómenos que ocurren al mismo tiempo. Cuando ocurre una reacción electroquímica en un biosensor, lo que realmente sucede es un intercambio de electrones en la superficie del electrodo. Sin embargo, este proceso no depende de un solo factor, sino que intervienen varios fenómenos al mismo tiempo: la facilidad con la que la solución conduce la electricidad, la manera en que las moléculas se adhieren a la superficie, el intercambio de cargas en ese punto de contacto y el movimiento de las moléculas desde el interior de la solución hasta el electrodo (Grieshaber et al., 2008).

Para entender todo lo que ocurre en ese pequeño espacio donde el electrodo entra en contacto con la solución, los científicos utilizan una herramienta muy útil: imaginan el sistema como si fuera un circuito eléctrico (Figura 5). No porque realmente haya cables y piezas electrónicas dentro del líquido, sino porque esta comparación permite organizar y describir mejor lo que está sucediendo. Cuando el sensor envía una señal eléctrica, la corriente encuentra distintos *obstáculos* en su camino (Mazlan et al., 2017).

Figura 5

Modelo simplificado que representa el funcionamiento del sensor como si fuera un circuito eléctrico



Nota. Cada elemento simboliza un proceso real: la resistencia del líquido al paso de la corriente (R_{sol}), la interacción de las moléculas en la superficie del electrodo (R_{ct}), la acumulación temporal de cargas en esa superficie (C_{dl}) y la velocidad con la que las moléculas llegan desde la solución (R_{dif}).

Estos *obstáculos* pueden representarse como diferentes componentes dentro de ese circuito equivalente, cada uno asociado a un proceso específico. Una parte de esa oposición proviene del R_{sol} : dependiendo de su composición, la electricidad puede fluir con mayor o menor facilidad. Otra parte ocurre justo en la R_{ct} , donde las moléculas interactúan y, en algunos casos, intercambian pequeñas cargas. Si este proceso es rápido, la corriente fluye más fácilmente; si es lento, ofrece mayor resistencia. Además, antes de llegar al electrodo, las moléculas deben desplazarse desde el interior de la solución hasta la R_{dif} . Si ese movimiento es rápido, la señal cambia de una manera; si es más lento, cambia de otra. Incluso la acumulación momentánea de cargas en la superficie también influye en la C_{dl} (Mazlan et al., 2017).

El modelo en forma de circuito reúne todos estos efectos en un solo esquema sencillo (Figura 5). Cada componente del circuito representa uno de esos procesos reales: el paso de la corriente por el líquido, la interacción en la superficie y el movimiento de las moléculas. Al analizarlos en conjunto, los investigadores pueden interpretar la impedancia. Es decir, qué tan difícil resulta para la electricidad atravesar el sistema y qué procesos están influyendo en esa dificultad (Yuan et al., 2010).

Esta forma de interpretar el sistema resalta una ventaja clave de la impedancia frente a otras medidas eléctricas más simples. A diferencia de la simple resistencia, que solo mide qué tanto se dificulta el flujo de corriente, la impedancia ofrece una visión más completa, ya que considera distintos factores que influyen en cómo la señal eléctrica se comporta dentro del sistema. En otras palabras, entiende cuánto se *frena* la electricidad, y también cómo responde el sistema ante cambios en la señal aplicada (Mazlan et al., 2017). La impedancia en sistemas microbiológicos refleja las propiedades eléctricas de las células, especialmente de la membrana, que actúa como un capacitor dependiente de la frecuencia. Los cambios de impedancia permiten diferenciar microorganismos según su estructura celular y composición de la pared. Además, la impedancia electroquímica es una herramienta no invasiva y rápida para caracterizar bacterias en tiempo real (Christy Dasmaseela et al., 2024).

En los biosensores de impedancia se utiliza un pequeño sistema de electrodos donde se aplica una señal eléctrica alterna controlada y se registra cómo responde el sistema. Al comparar la señal que entra con la que sale, es posible determinar la impedancia. Es decir, qué tanto se opone el sistema al paso de esa señal. Como la respuesta eléctrica no es inmediata, sino que presenta ligeros retrasos, la impedancia cambia dependiendo de la frecuencia de la señal aplicada. Analizando esa respuesta en diferentes frecuencias, los investigadores pueden distinguir distintos fenómenos que ocurren en la superficie del electrodo, como la unión de moléculas o cambios en la capa biológica del sensor (Randviir & Banks, 2022).

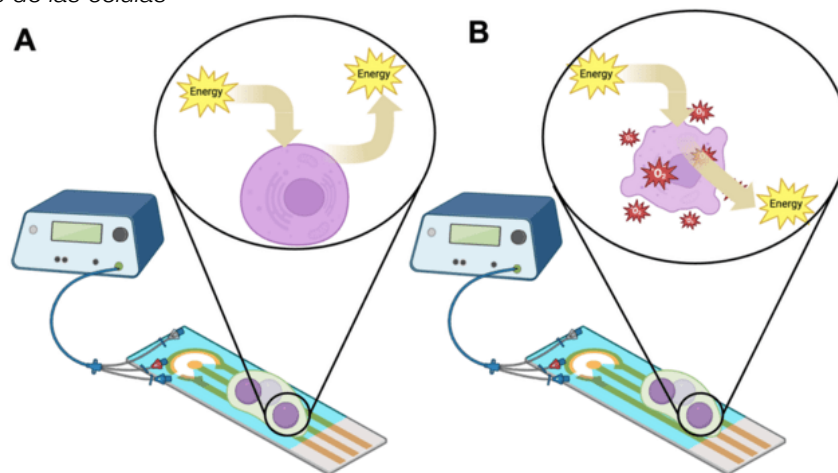
Estos cambios se originan principalmente en una región clave del biosensor conocida como la interfase electrodo–bioreceptor, que es el punto de encuentro entre el mundo biológico y el mundo electrónico del sensor. En esta superficie, el electrodo se encuentra recubierto con una capa biológica como enzimas, anticuerpos, ADN o incluso células, que tiene la capacidad de reconocer de manera específica a una molécula objetivo. Cuando el analito se une al bioreceptor, no solo ocurre una interacción biológica; también se generan cambios físicos y eléctricos en esa delgada capa superficial. Puede modificarse la distribución de cargas, la organización de las moléculas o la facilidad con la que la señal eléctrica atraviesa esa región. Estos pequeños cambios alteran la forma en que la señal eléctrica aplicada se comporta en el sistema. En los biosensores de impedancia, esas variaciones se reflejan como cambios en la oposición al paso de la señal eléctrica. Así, lo que comenzó como un evento microscópico, la unión entre dos moléculas termina convirtiéndose en una señal medible que puede registrarse y analizarse (Mamouni & Yang, 2011).

De manera particular, este fenómeno ocurre cuando el bioreceptor está formado por células o cuando se adhieren directamente a la superficie del electrodo. En estas condiciones, las células modifican la manera en que la electricidad puede atravesar el sistema. Al acumularse, funcionan como pequeñas barreras que dificultan el paso de la corriente, cambian la forma en que la electricidad circula por el líquido y alteran cómo se distribuyen las cargas en la superficie. Por ejemplo, si las bacterias forman una biopelícula (esa capa densa y organizada que crean al vivir en comunidad) el paso de la electricidad se vuelve más difícil. En cambio, si un antibiótico daña sus membranas, la corriente puede fluir con mayor facilidad. Cuando las células mueren, la señal eléctrica también se

transforma de una manera particular. Esto permite detectar que algo ha cambiado en el estado de la comunidad microbiana (Figura 6) (Deshpande et al., 2021; Randviir & Banks, 2013).

Figura 6

Ilustración de las señales de las células



Nota. (A) Cuando las bacterias forman una biopelícula, crean una capa que cubre el electrodo y dificulta el paso de la electricidad, como si fuera una barrera. (B) Cuando las células están dañadas, esa barrera se debilita y la electricidad puede circular con mayor facilidad.

Precisamente esta capacidad de detectar cambios directos en el comportamiento eléctrico del sistema es la que da lugar a una de las principales ventajas de los biosensores de impedancia, pues no requieren el uso de marcadores adicionales. En muchos métodos tradicionales es necesario añadir sustancias fluorescentes, enzimas o compuestos químicos que *etiqueten* a la molécula de interés para poder detectarla. En cambio, los biosensores impedimétricos detectan directamente los cambios eléctricos que ocurren cuando el analito se une al bioreceptor. Esto simplifica el procedimiento, reduce costos y evita pasos adicionales de preparación. Otra ventaja importante es que permiten realizar análisis en tiempo real. Esto significa que el sensor puede registrar los cambios conforme están ocurriendo, sin necesidad de esperar a que finalice una reacción o de realizar tratamientos posteriores (Mazlan et al., 2017).

De esta manera, es posible observar cómo se desarrolla la interacción molecular segundo a segundo, lo que resulta especialmente útil en estudios de afinidad, monitoreo biológico o detección temprana de contaminantes o patógenos. En conjunto, estas características hacen que los biosensores de impedancia sean herramientas sensibles, rápidas y eficientes para transformar eventos biológicos en señales eléctricas medibles. Además, cuando los electrodos interdigitados se combinan con mediciones eléctricas más detalladas, es posible observar no solo

la presencia de moléculas reactivas, sino también cómo estas afectan el comportamiento de la biopelícula. La acumulación de especies oxidantes puede alterar la membrana de las bacterias, modificar la estructura que las mantiene unidas y cambiar su actividad interna. Todo esto influye en la manera en que la electricidad atraviesa la comunidad microbiana (Shao & Xiao, 2020; Sun et al., 2015).

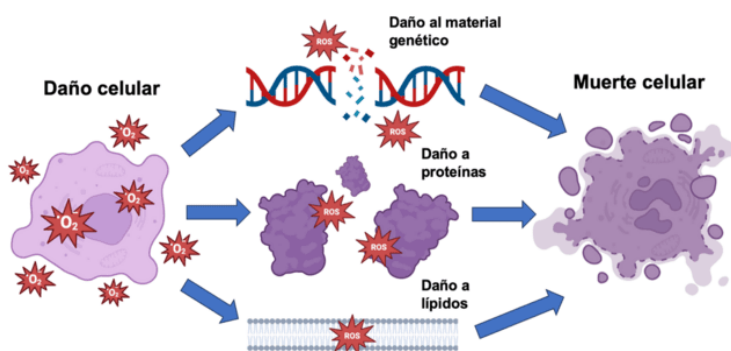
Estos cambios se reflejan en la señal eléctrica que registra el sensor, mostrando variaciones que indican cómo se está modificando el sistema. Así, los electrodos interdigitados no solo permiten detectar estas moléculas reactivas, sino también seguir en tiempo real cómo el estrés oxidativo impacta la forma en que las bacterias intercambian cargas y cómo funciona, en conjunto, el sistema bioeléctrico (Shao & Xiao, 2020; Sun et al., 2015).

2.4. Monitorización del estrés oxidativo

Los sensores electroquímicos son herramientas muy útiles para detectar moléculas altamente reactivas que se producen de manera natural durante distintos procesos biológicos. Estas sustancias pueden generar lo que se conoce como estrés oxidativo, una condición que afecta el equilibrio interno de las células. En condiciones normales, las propias células cuentan con mecanismos para mantener ese equilibrio y proteger sus funciones vitales. Sin embargo, cuando la cantidad de estas moléculas supera la capacidad de defensa celular, pueden producirse daños en componentes importantes como proteínas, lípidos o incluso el material genético, lo que en casos extremos puede llevar a la muerte celular (Figura 7). Medir el estrés oxidativo es importante, pues permite conocer el estado de una célula y entender si está funcionando adecuadamente o si se encuentra bajo alguna condición adversa. Esta información puede ser clave para estudiar diversas enfermedades y para evaluar el estado general de salud de un organismo (Deshpande et al., 2021; Li et al., 2020).

Figura 7

Esquema ilustrado de cómo las moléculas reactivas pueden afectar a una célula



Nota. Estas especies pueden dañar distintos componentes esenciales, como el material genético, las proteínas y los lípidos que forman la membrana celular. Cuando el daño se acumula y supera la capacidad de la célula para repararse, puede desencadenar finalmente la muerte celular.

El estrés oxidativo no solo puede estudiarse en el laboratorio de manera indirecta. Hoy en día, es posible monitorearlo casi en tiempo real gracias a los biosensores electroquímicos. Un ejemplo de ello es el desarrollo de sensores flexibles capaces de medir moléculas como el óxido nítrico, una sustancia que participa en procesos normales del organismo, pero que en concentraciones elevadas puede estar asociada con inflamación y daño celular. En este tipo de estudios, los investigadores diseñan dispositivos pequeños y biocompatibles que pueden colocarse en contacto directo con tejidos vivos. Primero se prueban en células cultivadas para observar cómo cambian los niveles de estas moléculas bajo diferentes condiciones (Li et al., 2020).

Posteriormente, se evalúan en modelos animales, como conejos, donde el sensor puede colocarse en zonas específicas. Por ejemplo, dentro de una articulación, para registrar de manera continua los cambios químicos asociados con procesos inflamatorios. La capacidad de estos dispositivos para transmitir información de forma constante permite seguir la evolución del estado del tejido sin recurrir a procedimientos repetitivos o invasivos. Así, los biosensores electroquímicos no solo ayudan a entender mejor el estrés oxidativo, sino que también representan una herramienta prometedora para el diagnóstico temprano y el monitoreo de enfermedades relacionadas con el daño celular (Li et al., 2020).

Dado que el estrés oxidativo desempeña un papel clave en la progresión de diversas enfermedades, se han intensificado los esfuerzos dirigidos a modular los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS) en distintos contextos clínicos con fines terapéuticos. En este sentido, tanto terapias convencionales como estrategias emergentes han sido evaluadas recientemente mediante técnicas electroquímicas, las cuales analizan de manera directa y sensible las variaciones en estos mediadores *redox* (Deshpande et al., 2021).

Sin embargo, los biosensores electroquímicos no solo tienen aplicaciones en el ámbito de la salud. En los últimos años, estas técnicas también se han comenzado a combinar con el uso de microorganismos para el análisis y monitoreo ambiental. Algunas bacterias pueden modificarse para que reaccionen de manera específica ante la presencia de ciertos contaminantes, lo que permite que el biosensor genere una señal más clara y precisa. Además, estos sistemas pueden adaptarse a distintos entornos, como agua potable, aguas residuales, suelos o sedimentos. Esto es posible porque muchas bacterias cambian su actividad cuando entran en contacto con sustancias contaminantes. Al detectar esas variaciones, el biosensor puede convertirlas en señales eléctricas medibles, facilitando así la identificación y el seguimiento de la contaminación ambiental (Haddour & Azri, 2023).

La literatura reciente muestra que los biosensores electroquímicos, basados en bacterias electroactivas, han sido aplicados en la detección de una amplia variedad de contaminantes ambientales. Entre los compuestos evaluados se encuentran metales pesados como cromo (Cr VI), cadmio (Cd II), zinc (Zn II), mercurio (Hg II), cobre (Cu II) y paladio (Pd II); compuestos orgánicos como 4-nitrofenol, 2,4-diclorofenol, atrazina, formaldehído y avermectina; antibióticos como el sulfato de neomicina; además de mezclas complejas como efluentes mineros, aguas residuales, lluvia ácida e incluso muestras de orina (Haddour & Azri, 2023).

En cuanto a la configuración del sensor, la mayoría de los sistemas emplean bioánodos o biocátodos integrados en configuraciones tipo celda de combustible microbiana (MFC) o sistemas electroquímicos de tres electrodos (TEC). Los materiales más utilizados para los electrodos incluyen tela de carbono, filtros de carbono, grafito y electrodos impresos (SPE), debido a su buena conductividad y compatibilidad con el crecimiento microbiano. En la mayoría de los casos, los microorganismos se inmovilizan mediante el crecimiento directo de biopelículas sobre la superficie del electrodo o mediante adsorción bacteriana (Haddour & Azri, 2023).

Las señales de detección reportadas incluyen cambios en corriente, voltaje, fuerza electromotriz e incluso respuestas fotoeléctricas. Estos sistemas han demostrado tiempos de respuesta que varían de segundos o minutos hasta algunas horas, dependiendo del contaminante y la configuración del sensor. Los límites de detección reportados son competitivos, con valores que alcanzan concentraciones muy bajas para ciertos metales y compuestos orgánicos. Asimismo, el tiempo de operación de los dispositivos puede extenderse desde días hasta varios meses, e incluso un año en algunos casos, lo que demuestra su potencial para monitoreo continuo. En conjunto, estos resultados evidencian que los biosensores electroquímicos basados en bacterias electroactivas constituyen una estrategia versátil y sensible para el monitoreo ambiental, con aplicaciones que abarcan desde la detección puntual de contaminantes específicos hasta la evaluación de la toxicidad en matrices complejas (Haddour & Azri, 2023).

2.5. Aplicaciones

Los electrodos interdigitados no solo se usan en investigación básica. También tienen aplicaciones en: Diagnóstico rápido de infecciones, evaluación de toxicidad ambiental, control de calidad en alimentos, desarrollo de nuevos antimicrobianos, agricultura y fitopatología. Su integración con electrónica portátil y sistemas miniaturizados abre la puerta a biosensores de campo, capaces de detectar respuestas microbianas directamente en ambientes agrícolas o clínicos (Figura 8).

Figura 8

Diagrama representativo de las aplicaciones de los electrodos interdigitados



Gran parte de estas aplicaciones se basan en el uso de la medición de la impedancia eléctrica, una técnica que, en los últimos años, se ha convertido en una herramienta cada vez más utilizada para estudiar distintos fenómenos biológicos. Esta técnica permite, por ejemplo, monitorear reacciones catalizadas por enzimas, detectar el reconocimiento entre biomoléculas como proteínas, ácidos nucleicos, anticuerpos o incluso células completas, así como seguir el crecimiento de bacterias o identificar su presencia en medios acuosos. El uso de electrodos interdigitados combinados con mediciones de impedancia ha facilitado el desarrollo de dispositivos más pequeños y portátiles, además de mejorar la sensibilidad de detección. Otra ventaja importante es que estos sistemas pueden fabricarse con relativa facilidad, lo que favorece su aplicación en diferentes áreas de investigación y diagnóstico (Varshney & Li, 2009).

Los electrodos interdigitados también pueden utilizarse para monitorear la calidad de los alimentos. Diversos estudios han demostrado que estos dispositivos permiten detectar bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* en productos como el pollo crudo. En algunos casos, ha sido posible identificarlas en concentraciones tan bajas como 10 células por mililitro en menos de una hora. Debido a su capacidad de reconocimiento selectivo, este tipo de biosensores también puede emplearse para identificar y monitorear otros patógenos presentes en los alimentos. Además, una de sus ventajas es que permiten diferenciar entre bacterias vivas y muertas, lo que ofrece información más precisa sobre el estado microbiológico del producto (Abdullah et al., 2019).

Otra área donde estos sensores muestran un gran potencial es el monitoreo ambiental. Los electrodos interdigitados pueden integrarse en dispositivos capaces de detectar sustancias contaminantes presentes en el agua. Por ejemplo, algunos sensores han sido diseñados para identificar iones como el cesio, un elemento que puede encontrarse en residuos industriales o nucleares. Al medir cambios en la conductividad del sistema, estos dispositivos pueden registrar variaciones en la concentración del contaminante, lo que abre la posibilidad de realizar monitoreo continuo de la calidad del agua (Nickson et al., 2010).

En el ámbito agrícola, los electrodos interdigitados se han utilizado para monitorear parámetros fisiológicos de las plantas. Un ejemplo es el desarrollo de sensores flexibles capaces de medir en tiempo real el contenido relativo de agua en hojas de tabaco durante su proceso de secado. Este tipo de sensores permite seguir los cambios de humedad en las hojas y optimizar las condiciones de secado, lo que puede mejorar la calidad del producto y facilitar la automatización del proceso (Cheng et al., 2025).

En conjunto, los electrodos interdigitados, combinados con mediciones de impedancia, representan una herramienta versátil y altamente sensible para el análisis de sistemas biológicos, ambientales y alimentarios. Su capacidad para detectar cambios eléctricos asociados a procesos microscópicos, junto con su potencial de miniaturización y aplicación en tiempo real, los posiciona como una tecnología prometedora en el desarrollo de biosensores modernos. A medida que estas herramientas continúan evolucionando, es posible ampliar su uso en distintas áreas, desde el diagnóstico hasta la agricultura de precisión. En este contexto, se debe reflexionar sobre sus alcances, ventajas y limitaciones, así como su papel en el desarrollo de nuevas estrategias de monitoreo y control.

3. CONCLUSIONES

Los electrodos interdigitados demuestran que la electricidad puede convertirse en un lenguaje para entender la biología. Cada cambio en una célula, ya sea daño, crecimiento o estrés, deja una huella eléctrica que puede medirse. En una época en la que se busca un monitoreo rápido, sensible y no invasivo, estos dispositivos representan una convergencia fascinante entre la microbiología, la biología molecular y la electroquímica. En esencia, son pequeñas estructuras metálicas que permiten *escuchar* lo que las células dicen cuando su entorno cambia. Aunque hoy en día se presentan como una alternativa prometedora frente a los métodos convencionales, aún queda mucho por comprender sobre los fenómenos que ocurren en estas interfaces y sobre todo el potencial que estos dispositivos podrían alcanzar para evaluar y monitorear distintos procesos biológicos.

Agradecimientos

A la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, México (Fondo Química es Evolución 2026) por el financiamiento otorgado al Cuerpo Académico Impacto Ambiental y Sustentabilidad (UAQ-CA-83).

REFERENCIAS

- Abdullah, A., Dastider, S. G., Jasim, I., Shen, Z., Yuksek, N., Zhang, S., Dweik, M., & Almasri, M. (2019). Microfluidic based impedance biosensor for pathogens detection in food products. *Electrophoresis*, 40(4), 508–520. <https://doi.org/10.1002/elps.201800405>
- Bonetto, M. C., Cortón, E., Pérgola, M., & Sacco, N. J. (2018). *Biosensores y celdas de combustible microbianas: Ciencia con texto*. Universidad de Buenos Aires.
- Cheng, X., Guo, W., Zhang, Y., Yan, X., Li, J., de Oliveira, R. F., Cheng, Q., & Xu, Q. (2025). Development of an interdigitated electrode sensor for monitoring tobacco leaf relative water content in bulk curing barn. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230, 109942.
- Christy Dasmaseela, E. M., Sugianto, W., & Nur'aidha, A. C. (2024). Analysis of Bacterial Characteristics Using the Electrical Impedance Spectroscopy Method. *Jurnal Pijar Mipa*, 19(5), 828–832. <https://doi.org/10.29303/jpm.v19i5.7061>
- Deshpande, A. S., Muraoka, W., & Andreescu, S. (2021). Electrochemical sensors for oxidative stress monitoring. *Current Opinion in Electrochemistry*, 29, 100809. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100809>
- Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., & Reimhult, E. (2008). Electrochemical Biosensors - Sensor Principles and Architectures. *Sensors*, 8(3), 1400–1458.
- Haddour, N., & Azri, Y. M. (2023). Recent Advances on Electrochemical Sensors Based on Electroactive Bacterial Systems for Toxicant Monitoring: A Minireview. *Electroanalysis*, 35(1). <https://doi.org/10.1002/elan.202200202>
- Hicks, M., Bachmann, T. T., & Wang, B. (2020). Synthetic Biology Enables Programmable Cell-Based Biosensors. *ChemPhysChem*, 21(2), 132–144. <https://doi.org/10.1002/cphc.201900739>
- Li, R., Qi, H., Ma, Y., Deng, Y., Liu, S., Jie, Y., Jing, J., He, J., Zhang, X., Wheatley, L., Huang, C., Sheng, X., Zhang, M., & Yin, L. (2020). A flexible and physically transient electrochemical sensor for real-time wireless nitric oxide monitoring. *Nature Communications*, 11(1).
- Mamouni, J., & Yang, L. (2011). Interdigitated microelectrode-based microchip for electrical impedance spectroscopic study of oral cancer cells. *Biomedical Microdevices*, 13(6), 1075–1088.
- Mazlan, N. S., Ramli, M. M., Abdullah, M. M. A. B., Halin, D. S. C., Isa, S. S. M., Talip, L. F. A., Danial, N. S., & Murad, S. A. Z. (2017). Interdigitated electrodes as impedance and capacitance biosensors: A review. *AIP Conference Proceedings*, 1885(1).
- Mehrotra, P. (2016). Biosensors and their applications – A review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 6(2), 153–159.
- Naresh, V., & Lee, N. (2021). A Review on Biosensors and Recent Development of Nanostructured Materials-Enabled Biosensors. *Sensors*, 21(4), 1109. <https://doi.org/10.3390/s21041109>
-
- Mena-Navarro, M. P., Campos-Guillén, J., Reyes-Betanzo, C., Ramos-López, M. A., De Moure-Flores, F. J., & Amaro-Reyes, A. (2026). Electrodo interdigitado: Innovación en la detección y monitoreo de sistemas biológicos. *Transdigital*, 7(13), e613. <https://doi.org/10.56162/transdigital613>

- Nickson, I. D., Boxall, C., & Port, S. N. (2010). Interdigitated electrode array based sensors for environmental monitoring of caesium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 9, 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/9/1/012044>
- Odijk, M., Olthuis, W., Dam, V. A. T., & van den Berg, A. (2008). Simulation of Redox-Cycling Phenomena at Interdigitated Array (IDA) Electrodes: Amplification and Selectivity. *Electroanalysis*, 20(5), 463–468. <https://doi.org/10.1002/elan.200704105>
- Randviir, E. P., & Banks, C. E. (2013). Electrochemical impedance spectroscopy: An overview of bioanalytical applications. *Analytical Methods*, 5(5), 1098–1115. <https://doi.org/10.1039/c3ay26476a>
- Randviir, E. P., & Banks, C. E. (2022). A review of electrochemical impedance spectroscopy for bioanalytical sensors. *Analytical Methods*, 14(45), 4602–4624. <https://doi.org/10.1039/d2ay00970f>
- Shao, B., & Xiao, Z. (2020). Recent achievements in exosomal biomarkers detection by nanomaterials-based optical biosensors - A review. *Analytica Chimica Acta*, 1114, 74–84.
- Sun, J.-Z., Peter Kingori, G., Si, R.-W., Zhai, D.-D., Liao, Z.-H., Sun, D.-Z., Zheng, T., & Yong, Y.-C. (2015). Microbial fuel cell-based biosensors for environmental monitoring: a review. *Water Science and Technology*, 71(6), 801–809. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.035>
- Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3184. <https://doi.org/10.1039/c3cs35528d>
- Varshney, M., & Li, Y. (2009). Interdigitated array microelectrodes based impedance biosensors for detection of bacterial cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 24(10), 2951–2960.
- Wollenberger, U. (1996). Electrochemical biosensors - ways to improve sensor performance. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 13(1), 237–266. <https://doi.org/10.1080/02648725.1996.10647931>
- Yuan, X. Z., Song, C., Wang, H., & Zhang, J. (2010). Electrochemical impedance spectroscopy in PEM fuel cells: fundamentals and applications. En *Fundamentals and Applications* (Ed.). *Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells* (pp. 263–345). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-846-9_6
- Zazueta-Gambino, A., Reyes-Betanzo, C., & Herrera-Celis, J. (2020). Design of a biosensor based on interdigitated microelectrodes with detection zone controlled by an integrated microfluidic. *Journal of Integrated Circuits and Systems*, 15(2), 1–5. <https://doi.org/10.29292/jics.v15i2.167>



Transdigital[®]

editorial

La Editorial *Transdigital* publica libros de carácter científico y académico. Se pueden publicar tesis de posgrado, una vez sometidas al sistema de evaluación de pares de doble ciego. Servicios:

- Gestión del International Standard Book Number (ISBN), del Digital Object Identifier (DOI) y del código de barras.
- Diseño gráfico
- Servicio de corrección de estilo y redacción.
- Dictaminación de la revisión por pares en doble ciego hecha por miembros del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México.
- Alojamiento permanente del libro en la editorial *Transdigital* (www.editorial.transdigital.mx)
- Distribución gratuita en *Dialnet*, *Google Books*, *Google Play* y *SCRIBD*.
- Distribución a precio mínimo en *Amazon Kindle* (cuota que pagan los lectores de *Kindle*).

La editorial *Transdigital* está en el Registro en el Padrón Nacional de Editores como agente editor Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales, S. C., con el Dígito Identificador 978-607-99594. Además, está afiliada a la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana (CANIEM) con el número 4069, de conformidad con el artículo 17 de la Ley de Cámaras Empresariales y sus Confederaciones en vigor. Y está en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIECYT) de la SECIHTI de México con el folio: RENIECYT 2400068.



Transdigital[®]

congreso virtual

El Congreso Virtual *Transdigital* se realiza anualmente de manera totalmente virtual (www.congreso.transdigital.mx). Este evento tiene el objetivo de reunir resultados parciales o finales de investigaciones empíricas, documentales o ensayos científicos sobre temas y desafíos que involucran a la tecnología y la transformación digital en sociedad.

Está dirigido a investigadores(as), docentes de todas las modalidades y niveles del sistema educativo, estudiantes de pregrado y posgrado, gestores(as) educativos(as), directivos(as) y demás profesionales interesados(as) en la investigación empírica y documental sobre el uso de la tecnología y la transformación digital en diversos ámbitos sociales, por ejemplo, la salud, el ocio, el turismo, las finanzas, la educación, el desarrollo comunitario, la industria, etcétera.

La inscripción por texto, con un máximo de tres autores(as) da el derecho de publicar la ponencia como capítulo de libro académico en la editorial *Transdigital*, una vez que ha sido admitida por el Comité Científico; además se otorgan certificados de ponencia y asistencia. Ese libro cuenta con International Standard Book Number (ISBN), Digital Object Identifier (DOI) y código de barras.

El Congreso Virtual *Transdigital* es una iniciativa que está inscrita en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIECYT) de la SECIHTI de México con el folio: RENIECYT 2400068.



Transdigital[®]

revista científica

La revista científica *Transdigital* es una publicación semestral bajo el modelo de publicación continua, de manera que se reciben textos durante todo el año. Es editada por la Sociedad de Investigación sobre Estudios Digitales S.C. Evalúa los textos con el sistema de pares de doble ciego. Se admiten Artículos de investigación y Ensayos científicos originales.

El proceso de publicación es expedito y, en promedio, los textos se publican tres meses después de que han sido recibidos. El Consejo científico y el Comité editorial se compone por distinguidas y distinguidos académicos de talla nacional e internacional. Cuenta con la Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-020912091600-102, International Standard Serial Number (ISSN) 2683-328X, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Hasta ahora, está indizada en Latindex, Dialnet, ERIHPLUS, REDIB, EuroPub, LivRe, AURA, Academic Resource Index (ResearchBib), MIAR, OpenAire-Explore, Refseek, Sherpa Romeo, Elektronische Zeitschriftenbibliothek, ZDB Zeitschriften Datenbank, WorldCat, Dimensions, The University of Liverpool, Discovery, Erasmus University Rotterdam, Mir@bel, REBIUN, DARDO, UOCI, LatinRev, ROAD, Google Scholar, Crossref, Scite, Lens, Internet Archive, BASE, etc.

El costo de publicación puede ser consultado en: www.revista.transdigital.mx