

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

CIENCIA VITAL

Revista de Divulgación Científica de la UACJ

ISSN: 3061-7944



Tradiciones vivas:

el rol de la realidad extendida
en la conservación del patrimonio cultural

Del dato a la gota:

uso de inteligencia artificial
para detectar fugas de agua en Chihuahua

Energía del desierto,

supercapacitores flexibles a base de nopal

k-NN, la eficiencia

de compararte con tus vecinos

La revolución 3D

en la medicina: stents que desaparecen y salvan vidas

La ergonomía del pedal

interruptor y el costo oculto de la fatiga laboral

Ratones como organismo

modelo de la endometriosis

Nanomedicina de precisión

para llevar CRISPR contra el cáncer de mama

UACJ INSPIRA EL
FUTURO

CIENCIA VITAL, VOL. 4, NO. 2, ABRIL-JUNIO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Dr. Daniel Constandse Cortez
Rector

Mtra. Guadalupe Gaytán Aguirre
Secretaria Académica

C. D. Salvador David Nava Martínez
Secretario General

Mayola Renova González
Coordinadora Editorial y de Publicaciones

Dr. Fausto Aguirre Escárcega
Director del Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte

Mtra. Tania Dolores Hernández García
Directora del Instituto de Ciencias Biomédicas

Dr. Erwin Adán Martínez Gómez
Director del Instituto de Ingeniería y Tecnología

Dr. Jesús Meza Vega
Director del Instituto de Ciencias Sociales y Administración

Dra. Nelly Gordillo Castillo
Jefa del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación

CIENCIA VITAL, volumen 4, número 2, abril-junio 2026, ISSN: 3061-7944. Es una revista de divulgación científica arbitrada mediante revisión por pares doble ciego, publicación trimestral, seriada y en línea, editada por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez a través del Consejo Editorial, Avenida del Charro núm. 450 norte, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C. P. 32310, teléfono +52 (656) 688-4841, <https://cienciavital.uacj.mx>, cienciavital@uacj.mx. Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo no. 04-2024-032714020600-102, otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dra. Nelly Gordillo Castillo. Fecha de la última actualización: 30 de junio de 2026. Las opiniones expresadas en los documentos publicados son responsabilidad exclusiva de sus autores. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes, siempre y cuando se cite la fuente.

Dra. Nelly Gordillo Castillo
Editora Jefa
Dr. Alberto Davis Ortiz
Coordinador General
Abib Adriana Reyes Díaz
Coordinadora General Estudiantil

PRODUCCIÓN

Mtro. Edgar Eliezer Martínez Espinola
Director Creativo
Mtro. Leonardo Arroyo Ortega
Administrador Web
América Itzayanne Ledesma Soriano
Edición Gráfica
Karla Marla Rascón
Diseño Editorial

REDES SOCIALES

Victor Alfonso Irigoyen Chaparro
Líder de Redes Sociales
Abib Adriana Reyes Díaz
Gestora de Programación de Redes Sociales
Anett Giselle González Rentería
Facebook
Luisa Fernanda Sandoval Gaytán
Instagram
Brandon Yahir Templos Marín
LinkedIn
Angélica Montserrath Colín Cárdenas
Tik Tok
Eylin Danae Flores Osorio
X

NOTICIENCIAS

Anett Giselle González Rentería
Líder Estudiantil de Sección
Ashley Naomi Pantoja Medrano
Corrección de Estilo



CIENCIAS APLICADAS

Dr. Manuel Alejandro
Chairez Ortega • *Editor de Sección*
Eylin Danae Flores Osorio • *Líder Estudiantil de Sección*
Joel Daniel Ochoa Lucio • *Comité Editorial Estudiantil*



CIENCIAS BÁSICAS

Dr. Héctor Alejandro Trejo Mandujano
Editores de Sección
Brandon Yahir Templos Marín
Líder Estudiantil de Sección
Victor Alfonso Irigoyen Chaparro
Mauricio Adrián Pinales Jiménez
Comité Editorial Estudiantil



CIENCIAS DE LA SALUD

Dra. Alejandra Vargas Caraveo
Dra. Yuridia Ortiz Rivera
Editores de Sección
Cesar Andrés Holguín Rivas
Líder Estudiantil de Sección
Jaqueline Gutiérrez Tapia
Kevin Iván Olivares Muñoz
Alexis Aguirre Simental
Comité Editorial estudiantil



CIENCIAS SOCIALES

Dr. Alberto Davis Ortiz
Editor de Sección
Anneth Nohemí Velázquez Mendoza
Líder Estudiantil de Sección
Luisa Fernanda Sandoval Gaytán
Comité Editorial Estudiantil



¿Y QUÉ OPINA LA CIENCIA?

Dr. Alberto Davis Ortiz
Editor de Sección
Daniela Alejandra Chávez Espino
Líder Estudiantil de Sección



DIMENSIONES ÉTICAS

Dra. Nelly Gordillo Castillo
Editora de Sección
Frida Sofía Lizárraga Tavares
Líder Estudiantil de Sección
Ana María García Castro
Comité Editorial Estudiantil



ENTREVISTAS

Dr. Alberto Davis Ortiz
Editor de Sección
Daniela Alejandra Chávez Espino
Líder Estudiantil de Sección
Jesús Daniel Rivas Valenzuela
Javier Ramírez Hernández
Comité Editorial Estudiantil



SALUD MENTAL

Mtra. Ana Cecilia Gutiérrez de la Peña
Dra. Bertha Musi Lechuga
Editores de Sección
Michelle Arely Berrueto Duarte
Líder Estudiantil de Sección
Flor Minerva Montejo Dávila
Comité Editorial Estudiantil



UACJ POR EL MUNDO

Dr. Alberto Davis Ortiz
Editor de Sección
Ashley Naomi Pantoja Medrano
Líder Estudiantil de Sección



Acerca de ciencia vital

Ciencia Vital Revista de Divulgación Científica de la UACJ es una publicación seriada, en línea, publicada en modalidad continua con cuatro números anuales por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) a través del Consejo Editorial. Su propósito fundamental es tender puentes entre el conocimiento científico y la comunidad en general. Con Ciencia Vital, buscamos acercar la ciencia a las personas de una forma clara, accesible y, sobre todo, confiable

REVISIÓN POR PARES

Cada manuscrito sometido a Ciencia Vital es meticulosamente evaluado a través de un riguroso proceso de revisión por pares doble ciego. Este proceso asegura la calidad, relevancia y rigor científico de cada artículo. Nuestros revisores, expertos en sus respectivos campos, aportan sus conocimientos y perspectivas críticas para garantizar que cada trabajo cumpla con los más altos estándares académicos

INVITACIÓN A CONTRIBUIR

Extendemos una cordial invitación a investigadores, académicos y expertos a considerar Ciencia Vital para la publicación de sus trabajos. Su contribución es esencial para continuar construyendo un conocimiento científico accesible, confiable y de vanguardia.

ACCESO ABIERTO PARA AMPLIFICAR EL CONOCIMIENTO

Comprometidos con la democratización del conocimiento, Ciencia Vital opera bajo un modelo de acceso abierto. Esto significa que todos los artículos son accesibles sin costo alguno para los lectores de todo el mundo, fomentando una mayor difusión y un impacto más amplio de las investigaciones presentadas. Aunado a esto, las publicaciones se comparten en la página web cienciavital.uacj.mx y a través de nuestras redes académicas y sociales en un formato amigable que fácilmente puede ser compartido

DIVERSIDAD Y COLABORACIÓN INTERNACIONAL

Alentamos la participación de autores de todo el mundo, creando un espacio inclusivo y diverso para la discusión científica. Nuestra plataforma fomenta la colaboración internacional, regflejando la naturaleza global de la ciencia y la investigación.

INNOVACIÓN Y ACTUALIDAD EN LA INVESTIGACIÓN

Los autores de Ciencia Vital están en la vanguardia de sus campos, presentando investigaciones innovadoras y relevantes. A través de su trabajo, abordan desafíos actuales y ofrecen nuevas perspectivas y soluciones.

Contenido

Tradiciones vivas:

el rol de la realidad extendida en la conservación del patrimonio cultural

Del dato a la gota:

uso de inteligencia artificial para detectar fugas de agua en Chihuahua

Energía del desierto,

supercapacitores flexibles a base de nopal

k-NN, la eficiencia

de compararte con tus vecinos

La revolución 3D

en la medicina: stents que desaparecen y salvan vidas

La ergonomía del pedal

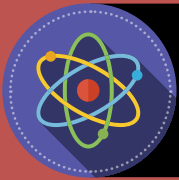
interruptor y el costo oculto de la fatiga laboral

Ratones como organismo

modelo de la endometriosis

Nanomedicina de precisión

para llevar CRISPR contra el cáncer de mama



CIENCIAS APLICADAS

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026

<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.apl.01>
e0401APL01

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UACJ
ISSN: 2615-7944

Tradiciones vivas: el rol de la realidad

extendida en la
conservación del
patrimonio cultural



Dra. Alejandra Lucía
De la Torre Rodríguez¹

Dr. Ramón Iván Barraza Castillo^{*2}

Mtra. Anahí Solís Chávez³

Mtro. Rogelio Baquier Orozco⁴

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez <https://orcid.org/0000-0003-0552-1334>

^{*2} Universidad Autónoma de Ciudad Juárez <https://orcid.org/0000-0002-5450-0583>. ramon.barraza@uacj.mx

³ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez <https://orcid.org/0000-0003-1175-2075>

⁴ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez <https://orcid.org/0000-0002-4007-8174>



RESUMEN

México posee una de las mayores riquezas culturales del mundo, reflejada en sus festividades, tradiciones, artesanías y expresiones orales que fortalecen la identidad y el sentido de pertenencia de sus comunidades. Este artículo explora cómo la realidad extendida (RE), un conjunto de tecnologías que incluye realidad virtual, aumentada y mixta, puede ayudar a preservar y difundir el patrimonio cultural intangible mediante experiencias digitales inmersivas e interactivas. A través de proyectos académicos desarrollados en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, se muestra cómo tradiciones como los altares de muertos, las catrinas y la mitología del Mictlán pueden reinterpretarse en entornos virtuales para acercarlas a nuevas generaciones. Además de fomentar el aprendizaje tecnológico, estas iniciativas permiten reflexionar sobre nuevas formas de conservar la memoria cultural en una sociedad cada vez más digital. El artículo destaca el potencial de la tecnología no solo como herramienta educativa, sino también como un puente entre innovación, creatividad y patrimonio cultural.

Introducción

Las tradiciones culturales no desaparecen de un día a otro; cambian de manera silenciosa cuando dejan de transmitirse entre generaciones. En un contexto donde gran parte de la experiencia cotidiana ocurre en entornos digitales interactivos, el patrimonio cultural intangible enfrenta un desafío fundamental: ¿cómo preservar prácticas vivas, como rituales, narraciones, celebraciones y saberes colectivos, en una sociedad que aprende, interactúa y se relaciona cada vez más a través de las tecnologías digitales?

México posee una gran diversidad cultural que constituye un elemento central de identidad y pertenencia social. Iturriaga [1] indica que el país se encuentra entre los de mayor diversidad cultural en el mundo, una riqueza que se manifiesta en festividades, expresiones artísticas y tradiciones que se transmiten de generación en generación. Estas manifestaciones conforman un patrimonio colectivo que fortalece el sentido de comunidad y permite compartir valores culturales con nuevas generaciones.

El patrimonio cultural intangible puede experimentarse mediante múltiples formas, desde el lenguaje y las expresiones orales hasta la música, la danza, las técnicas artesanales y los actos festivos [2]. Aguirre-Tejada et al. [3] explican que patrimonializar implica reconocer socialmente ciertas prácticas o expresiones como portadoras de valor simbólico, social o económico. En este sentido, Pérez e Hincapié [4] definen el patrimonio “como un conjunto de bienes materiales e inmateriales que se heredan, transforman y enriquecen con el tiempo, reforzando la identidad cultural de una comunidad” (p. 519).

Ante este panorama, la realidad extendida (RE) emerge como una herramienta contemporánea capaz de transformar la manera en que las personas interactúan con la cultura. La RE, que integra realidad virtual (RV), realidad aumentada (RA) y realidad mixta (RM), permite fusionar entornos físicos y digitales para generar experiencias inmersivas e interactivas [5]. Como señalan Vasarainen et al. [6], este concepto engloba diversas tecnologías que combinan lo real y lo virtual, lo que amplía las posibilidades de aprendizaje, exploración y participación cultural.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo mostrar cómo proyectos académicos mediante RE pueden contribuir a la preservación, reinterpretación y difusión del patrimonio cultural intangible en México. A través de experiencias colaborativas realizadas en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), se explora cómo estas tecnologías permiten acercar las tradiciones a nuevas generaciones mediante formas de interacción activa, favoreciendo el aprendizaje tecnológico y el fortalecimiento del vínculo cultural.

En los últimos años, las tecnologías inmersivas como la RV, la RA y la RM, agrupadas dentro del concepto de RE, han comenzado a transformar las formas de presentación y mediación del patrimonio cultural, al permitir experiencias más interactivas y accesibles para diversos públicos. Diversas investigaciones coinciden en señalar que estas tecnologías favorecen procesos de aprendizaje experiencial al incrementar la sensación de presencia y participación del usuario

dentro de los entornos culturales digitales. En revisiones sistemáticas recientes, se ha documentado un crecimiento sostenido en la aplicación de experiencias inmersivas en contextos patrimoniales, identificando tanto avances tecnológicos como desafíos asociados a su implementación [7]. Estudios comparativos también señalan que los sistemas de RE basados en visores generan mayores niveles de inmersión que los dispositivos móviles tradicionales, aunque aún persisten limitaciones relacionadas con el diseño de la experiencia de usuario y su integración pedagógica [8].

Sin embargo, el uso de tecnologías en el ámbito cultural también ha generado debates. Diversos estudios señalan que la digitalización del patrimonio puede afectar su autenticidad en las representaciones virtuales, especialmente cuando las experiencias se simplifican o se alejan de los contextos originales donde las tradiciones ocurren.

La Figura 1 presenta un contraste entre representaciones de patrimonio cultural intangible. En la imagen de la izquierda se muestra un altar tradicional mexicano donde la interacción de las personas se limita principalmente a la contemplación, ya que los objetos expuestos no pueden manipularse. En la imagen de la derecha se observa un sistema de desarrollo de altares virtuales interactivos, donde el usuario, además de contemplar la ofrenda, puede experimentar un ambiente inmersivo construido mediante gráficos por computadora y elementos tecnológicos que permiten manipular distintos objetos del entorno.

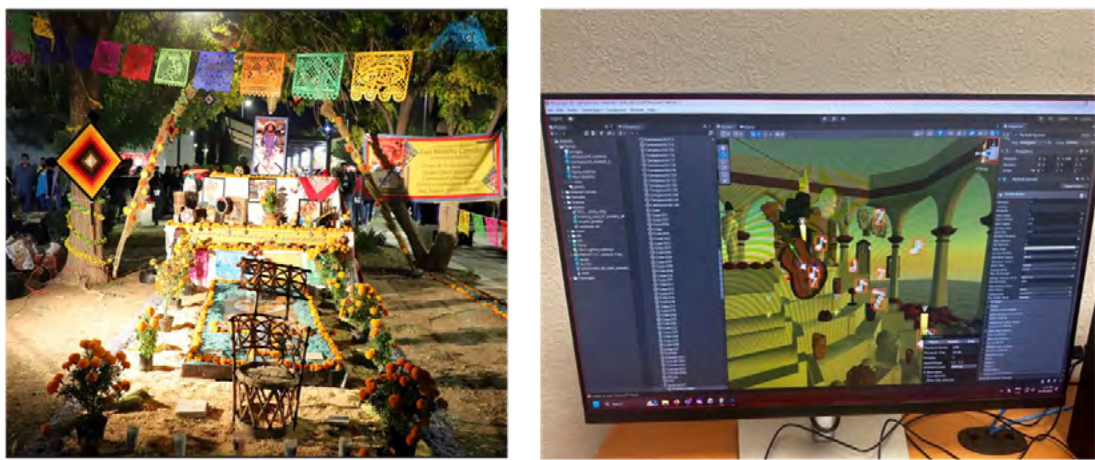


Figura 1. Representaciones de patrimonio cultural intangible.

Esta riqueza cultural, aunque intangible, debe ser documentada y compartida para llegar a nuevas generaciones. En este sentido, la RE, entendida como un concepto que abarca la RV, la RA y la RM [5], ofrece nuevas formas de experimentar y transmitir las tradiciones. Esta tecnología fusiona los entornos reales y virtuales mediante la interacción humana a través de dispositivos computacionales. Asimismo, Vasarainen et al. [6] mencionan que el término RE funciona como una definición general que se aplica a diversos tipos de tecnologías y experiencias híbridas entre el mundo físico y el virtual.

Por otro lado, la RE puede emplearse en espacios académicos donde, a partir de proyectos colaborativos entre estudiantes y docentes, se genera un medio de difusión tecnológica que permite al usuario interactuar con sucesos, prácticas y expresiones culturales mediante la virtualidad. La experiencia de usuario puede resultar positiva, ya que permite reinterpretar costumbres y tradiciones sin perder su esencia.

En este documento se explica cómo la RE funciona como un medio para acercar a las nuevas generaciones a tradiciones vigentes en México. Se trata de un recurso tecnológico académico que permite a los estudiantes innovar durante su desarrollo, al mismo tiempo que favorece experiencias atractivas donde, además de leer sobre las tradiciones, las personas pueden experimentarlas de manera interactiva para fomentar la participación activa y el aprendizaje cultural.

Del laboratorio a la experiencia: proyectos colaborativos de realidad extendida en la UACJ

La Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), a través del Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte (IADA), ha desarrollado diversos proyectos académicos que incorporan tecnologías de RE para explorar nuevas formas de representar el patrimonio cultural intangible. Mediante proyectos colaborativos entre docentes y estudiantes, se han creado experiencias digitales que permiten a los usuarios interactuar con diversas expresiones culturales.

Estas iniciativas buscan explorar nuevas formas de acercamiento al patrimonio cultural mediante el uso de tecnologías digitales en contextos educativos. También funcionan como medios tecnológicos que fomentan el compromiso dinámico y la exploración cultural. Los laboratorios de la universidad están equipados con dispositivos de visualización de compañías como Meta, HTC y Apple, lo que brinda a los estudiantes medios para experimentar con diferentes tecnologías.

La Tabla 1 presenta algunos de los proyectos desarrollados en el programa de Diseño Digital de Medios Interactivos (DDMI), indicando el nivel académico de los participantes, la tecnología empleada y el tipo de colaboración interdisciplinaria.

Tabla 1. Proyectos con realidad extendida.

Nombre del proyecto	Nivel de estudios de los participantes	Tecnología empleada	Interdisciplinariedad
Altars virtuales	Principiante e intermedio	Realidad virtual	No
Catrinas interactivas	Intermedio y avanzado	Realidad mixta	Sí. Diseño y Gestión de la Moda y Diseño Digital
Postales mexicanas en RV	Avanzado	Realidad virtual	Sí. Historia y Diseño Digital
Recorrido virtual del Mictlán	Avanzado e intermedio	Realidad virtual	Sí. Historia, música y Diseño Digital

El valor del aprendizaje interdisciplinario

Dado que la universidad cuenta con laboratorios equipados con dispositivos de visualización de compañías como Meta, HTC y Apple, los estudiantes tienen acceso a ellos para experimentar con el diseño y desarrollo en diferentes tecnologías, aunque se ha observado una preferencia por la RV. En varios de estos proyectos se ha promovido la colaboración entre distintos programas académicos, lo que permite integrar perspectivas provenientes del diseño, la historia, la música y otras áreas del conocimiento.

Estos proyectos también funcionan como ejercicios de aprendizaje en los que los estudiantes aplican conocimientos relacionados con el modelado tridimensional, el diseño de interacción y el desarrollo de entornos virtuales. Los proyectos involucran a estudiantes de distintos niveles de formación, desde cursos iniciales hasta etapas avanzadas del programa académico, permitiendo que la tecnología se utilice tanto como herramienta de aprendizaje inicial como para el desarrollo de proyectos más complejos.

A continuación, se describen brevemente las características y el proceso de desarrollo de algunos de estos proyectos, con el fin de ilustrar cómo se integran las tecnologías de RE en experiencias educativas vinculadas al patrimonio cultural.

Altare virtuales

Una de las tradiciones más representativas de México es la festividad del Día de Muertos, proclamada patrimonio cultural intangible de la humanidad por la UNESCO en 2003 e inscrita en su lista representativa en 2008 [9]. Esta festividad constituye una fusión entre prácticas rituales de pueblos originarios y celebraciones católicas europeas.

La pieza central de esta celebración es el altar de muertos. Estas ofrendas son confeccionadas con elementos profundamente simbólicos relacionados con la persona homenajeada, incluyendo objetos personales, alimentos y bebidas. Sin embargo, el altar no se reduce a una estructura física; también constituye una narración visual que evoca emociones y memorias.

En este contexto surge la idea de crear versiones virtuales de estas piezas, respetuosas de su significado cultural y capaces de construir ofrendas más elaboradas y accesibles, difíciles de replicar en el mundo físico. De esta manera, la tecnología se convierte en un puente que amplía las posibilidades de expresión y mantiene viva la tradición en entornos contemporáneos.

El desafío educativo: aprender haciendo

Para desarrollar este proyecto de innovación cultural participaron estudiantes principiantes del programa de Diseño Digital de Medios Interactivos. Los estudiantes investigaron y aprendieron sobre los elementos, materiales y significados simbólicos del altar tradicional mexicano. Posteriormente, con la guía de docentes y estudiantes avanzados, transformaron este conocimiento en diseños interactivos utilizando Unity, un motor de desarrollo de videojuegos ampliamente utilizado.

Los estudiantes trabajaron en equipo proponiendo personajes a quienes dedicar los altares. Después desarrollaron modelos tridimensionales y, posteriormente, implementaron la interacción dentro del entorno virtual mediante visores Meta Quest.

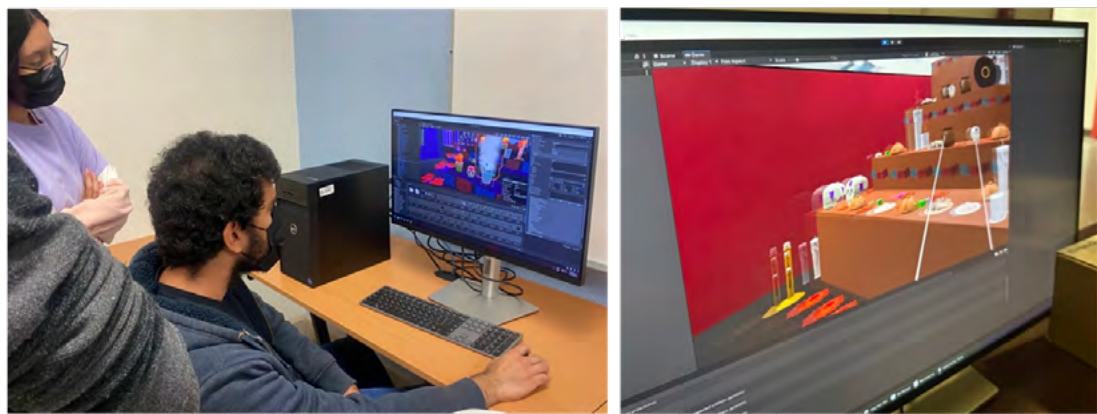


Figura 2. Desarrollo de altares virtuales por estudiantes.

Una vez concluidos, los proyectos fueron expuestos al público durante la tradicional celebración de Altares y Tumbas organizada por el IADA desde hace más de 40 años. La muestra permitió que los visitantes experimentaran los altares en RV y observaran nuevas formas de interacción cultural. La respuesta del público fue positiva, destacando la experiencia como “sorprendente”, “emotiva” e “innovadora”.

Sin embargo, el proyecto también enfrenta retos importantes. Aunque se concentra en ciertos símbolos tradicionales del Día de Muertos, el patrimonio cultural mexicano es diverso y varía según la región. Esto implica el riesgo de simplificar manifestaciones culturales específicas. Además, el acceso a dispositivos de RV continúa siendo costoso y limitado para muchos entornos

educativos. Finalmente, la evaluación del impacto emocional de las experiencias aún se basa en observaciones puntuales, sin estudios de seguimiento a largo plazo.

Estas limitaciones no restan valor al proyecto; por el contrario, muestran los desafíos reales de integrar tecnología y patrimonio cultural dentro de procesos educativos contemporáneos.

Catrinas interactivas

La Calavera Garbancera, grabado realizado por el artista mexicano José Guadalupe Posada a inicios del siglo XX, es una de las representaciones gráficas más reconocidas de la cultura mexicana. Originalmente surgió como una crítica social hacia sectores que imitaban modas europeas dejando de lado sus raíces culturales.

La figura alcanzó una mayor difusión en 1947, cuando Diego Rivera la incluyó en el mural Sueño de una tarde dominical en la Alameda Central. Desde entonces, la Catrina se consolidó como un símbolo ampliamente asociado con el Día de Muertos.

A partir de esta tradición visual surgió el proyecto Catrinas Interactivas, desarrollado en 2024 como una iniciativa académica orientada a integrar patrimonio cultural y tecnologías digitales. El objetivo del proyecto consiste en modelar tridimensionalmente la figura de la Catrina e incorporar vestimentas diseñadas por estudiantes del programa de Diseño y Gestión de la Moda (DGM).

En este proyecto participan estudiantes de dos programas académicos. Por un lado, los estudiantes de DGM diseñan atuendos inspirados en temáticas culturales propuestas por el instituto. Por otro, estudiantes avanzados de DDMI modelan digitalmente las figuras y vestimentas mediante herramientas de modelado tridimensional.

El proyecto utiliza tecnología de RM, la cual combina elementos virtuales con el entorno físico del usuario mediante dispositivos especializados, como el Apple Vision Pro. Gracias a esta tecnología, los usuarios pueden cambiar vestimentas, rotar modelos y modificar escalas dentro de una experiencia interactiva.

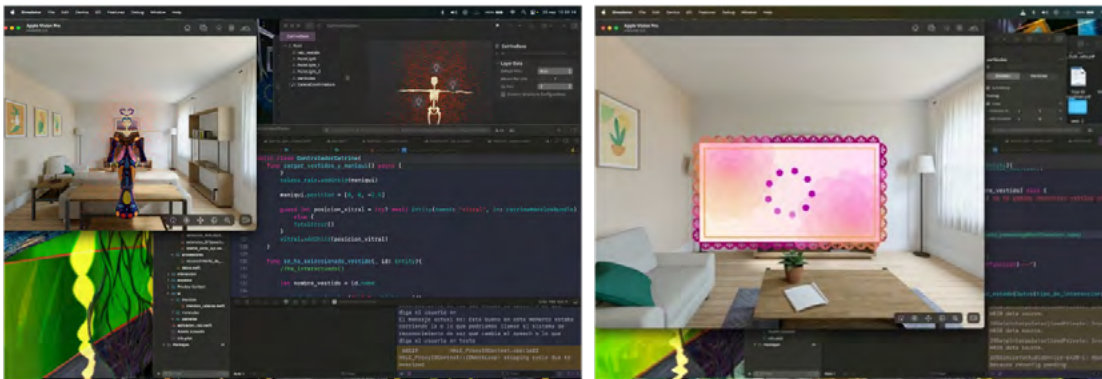


Figura 3. Interfaz de desarrollo del proyecto Catrinas Interactivas.

La innovación central del proyecto radica en la capacidad de insertar modelos digitales dentro del espacio físico del usuario, permitiendo una interacción inmersiva entre cultura, diseño y tecnología.

Aunque este tipo de experiencias abre nuevas posibilidades de interacción cultural, también depende del acceso a dispositivos especializados y del diseño cuidadoso de interfaces accesibles para distintos públicos.

Postales mexicanas en RV

Para conmemorar los 30 años de la Biblioteca Central Carlos Montemayor, se desarrolló un proyecto orientado a acercar las colecciones especiales de la biblioteca a estudiantes, docentes y público general.

Estas piezas históricas requieren protocolos estrictos de conservación, incluyendo control climático y medidas de protección para su consulta física. Por ello, se propuso una alternativa digital basada en RV para permitir la exploración de postales históricas sin comprometer la integridad de los documentos originales.

El proyecto consistió en digitalizar postales históricas y convertirlas en experiencias inmersivas donde los usuarios pudieran acceder no solo a imágenes de alta calidad, sino también a elementos audiovisuales que contextualizaran la información histórica.

El desarrollo fue realizado por estudiantes y docentes especializados en digitalización, virtualización e interactividad en ambientes de RV.



Figura 4. Representación en RV de las postales mexicanas.

Para evaluar el impacto del proyecto se aplicaron pruebas de usabilidad. Los resultados cualitativos mostraron que la combinación entre acervos físicos y tecnología digital facilitó la conexión del público con la historia de México mediante formatos interactivos.

Sin embargo, también se identificaron limitaciones, como la curva de aprendizaje para utilizar los visores de RV y el alto costo de los dispositivos necesarios para estas experiencias.

Esta iniciativa no solo celebra tres décadas de servicio de la biblioteca, sino que también plantea una reflexión relevante: ¿la reinterpretación virtual puede sustituir la experiencia física de interactuar con documentos históricos originales, o debe entenderse únicamente como una herramienta complementaria?

Recorrido virtual por el Mictlán

El Mictlán forma parte de la mitología mexicana y representa una de las concepciones más complejas sobre la muerte dentro de la cosmovisión prehispánica. La palabra Mictlán proviene del náhuatl y significa “lugar de los muertos”.

Según la tradición, el Mictlán estaba conformado por nueve niveles que el alma debía atravesar después de la muerte. Cada uno representaba una prueba simbólica vinculada con el desprendimiento del mundo terrenal.

Itzcuintlán (lugar de los perros). El alma debía cruzar un río con ayuda de un perro xoloitzcuintle.

Tepeme Monamictlán (lugar donde se juntan las montañas). El difunto atravesaba entre montañas que chocaban constantemente.

Iztepetl (montaña de obsidiana). Un camino lleno de fragmentos de obsidiana simbolizaba el desprendimiento material.

Itzehecayan (lugar del viento). Un espacio helado representaba la pérdida de vínculos con el mundo de los vivos.

Paniecatacoyan (lugar donde la gente vuela). Los fuertes vientos simbolizaban el caos y la transición final.

Timiminaloyan (lugar donde te flechan). Flechas invisibles representaban las dificultades enfrentadas en vida.

Teyollocualoyan (lugar donde se comen los corazones). La liberación emocional se representaba mediante animales salvajes.

Apanohualoyan (río de agua negra). El alma atravesaba un río profundo como parte de su purificación.

Chicunamictlán (lugar de las nueve aguas). El destino final bajo la presencia de Mictlantecuhtli y Mictecacíhuatl.

Cada uno de estos niveles posee elementos visuales y simbólicos que pueden reinterpretarse mediante proyectos digitales interactivos. En este contexto, se desarrolló una propuesta de recorrido virtual utilizando tecnologías de RV.

El proyecto funciona como una actividad colaborativa entre docentes y estudiantes del programa DDML. Los participantes investigan la mitología mexicana y diseñan representaciones visuales integradas posteriormente en entornos tridimensionales interactivos.

La RV permite recrear escenarios inspirados en relatos como el río Apanohualoyan o la montaña de obsidiana mediante modelado tridimensional, texturizado y programación de interacción.

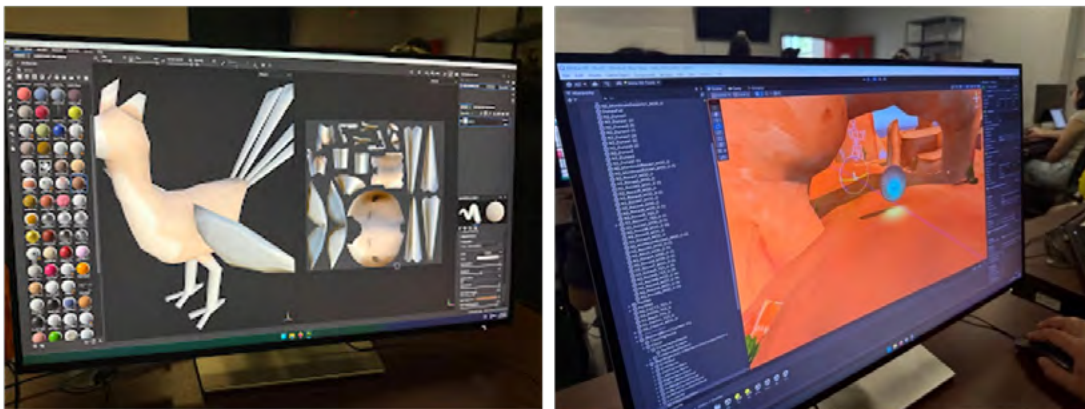


Figura 5. Texturizado y desarrollo del Mictlán.

Actualmente, el proyecto continúa en desarrollo debido a la complejidad de integrar animación, diseño sonoro, programación e interacción dentro de un entorno virtual coherente.

Reflexión

La integración del patrimonio cultural intangible con tecnologías de RE dentro del aula permitió observar diversos resultados en el aprendizaje de los estudiantes. A través del desarrollo de estos proyectos, los alumnos participaron en actividades que combinaron investigación cultural, diseño visual y desarrollo tecnológico.

Durante el proceso se fortalecieron competencias relacionadas con el modelado tridimensional, texturizado, programación de entornos interactivos y diseño de experiencias de usuario. Asimismo, el trabajo en equipo favoreció habilidades como la comunicación, la organización y la resolución colaborativa de problemas.

El desarrollo de estos proyectos también promovió la exploración de contenidos culturales vinculados con tradiciones mexicanas. Al trabajar con elementos del patrimonio cultural intangible, los estudiantes investigaron significados simbólicos y expresiones culturales que posteriormente integraron dentro de experiencias digitales interactivas.

Desde la experiencia docente, la realización de proyectos de RV y RM con grupos numerosos requiere planeación previa, organización de recursos tecnológicos y coordinación entre distintas áreas académicas y administrativas.

En este sentido, el trabajo con tecnologías de RE puede entenderse no solo como una práctica tecnológica, sino como un proceso educativo que integra investigación cultural, diseño y experimentación.

Conclusiones

La implementación de tecnologías de RE en proyectos educativos vinculados con el patrimonio cultural intangible ofrece una oportunidad para integrar aprendizaje tecnológico y exploración cultural.

En los proyectos desarrollados, los estudiantes participaron en la creación de experiencias digitales que reinterpretan elementos culturales mediante entornos virtuales interactivos. La presentación de los proyectos al público permitió incorporar retroalimentación de los usuarios, facilitando la identificación de áreas de mejora relacionadas con navegación, interacción y claridad de contenidos.

Asimismo, el trabajo con tecnologías inmersivas demuestra su potencial para contribuir a la difusión y documentación del patrimonio cultural intangible. Debido a su carácter no material, muchas prácticas culturales resultan difíciles de registrar mediante medios tradicionales. Las tecnologías inmersivas permiten representar espacios, objetos y prácticas culturales en entornos digitales que pueden consultarse posteriormente con fines educativos y de investigación.

Finalmente, el uso del patrimonio cultural intangible como eje temático favoreció la integración entre teoría, práctica y experimentación tecnológica dentro del proceso educativo.

Referencias

[1] J. N. Iturriaga, Patrimonio cultural intangible y desarrollo en el México megadiverso, 2003.

[2] J. C. Domínguez Domingo, “Diversidad cultural en la Muestra Internacional de Obras Audiovisuales sobre Patrimonio Cultural Inmaterial en México,” *Rebeca - Revista Brasileira de Estudos de Cinema e Audiovisual*, vol. 14, no. 1, 2025. doi: <https://doi.org/10.22475/rebeca.v14n1.1239>

[3] B. V. Aguirre-Tejeda, C. L. Gilabert-Juárez y A. M. Salazar-Peralta, “La patrimonialización en México: las disputas en torno al patrimonio cultural intangible,” *Córima, Revista de Investigación en Gestión Cultural*, 2 mar. 2021. doi: <https://doi.org/10.32870/cor.a5n9.7364>

[4] F. O. M. Pérez y J. M. M. Hincapié, “Intangible Cultural Heritage and Creative Ecosystems: A Literature Review,” *Revista Finanzas y Política Económica*, vol. 15, no. 2, pp. 517–535, 2023. doi: <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.v15.n2.2023.9>

[5] M. Alnagrat et al., “Extended Reality Technologies and Cultural Interaction,” 2022.

[6] M. Vasarainen, S. Paavola y L. Vetoshkina, “A Systematic Literature Review on Extended Reality: Virtual, Augmented and Mixed Reality in Working Life,” *International Journal of Virtual Reality*, vol. 21, no. 2, pp. 1–28, 2021. doi: <https://doi.org/10.20870/ijvr.2021.21.2.4620>

[7] Y. Wang et al., “Immersive Technologies in Cultural Heritage: A Systematic Review,” 2024.

[8] T. Innocente et al., “Comparative Studies on Extended Reality Systems and User Immersion,” 2023.

[9] UNESCO, “El Día de Muertos: El regreso de lo querido,” UNESCO, 29 oct. 2019. Disponible en: <https://www.unesco.org/es/articles/el-dia-de-muertos-el-regreso-de-lo-querido>



CIENCIAS APLICADAS

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026

<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.apl.02>
e0402APL02

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UACJ
ISSN: 2657-1944

Del dato a la gota: uso de inteligencia artificial

para detectar fugas de agua en Chihuahua

Dr. Aarón Heriberto Narváez Burciaga*¹

Dr. Jesús Roberto López Santillán²

Dr. Luis Carlos González Gurrola³



1 Universidad Autónoma de Chihuahua
<https://orcid.org/0009-0005-4247-5762>
ahnarvaez@gmail.com

2 Universidad Autónoma de Chihuahua
<https://orcid.org/0000-0001-6186-0192>

3 Universidad Autónoma de Chihuahua
<https://orcid.org/0000-0003-1546-9752>



RESUMEN

La pérdida de agua por fugas en las redes de distribución representa uno de los mayores desafíos para el manejo sostenible de este recurso. En países en desarrollo, se estima que más del 40 % del agua enviada a la red se desperdicia, mientras que en algunas ciudades del estado de Chihuahua estas pérdidas superan el 50 %. Ante este panorama, la inteligencia artificial (IA), una tecnología capaz de identificar patrones y generar información útil a partir de grandes cantidades de datos, surge como una herramienta prometedora para mejorar la detección de fugas. Este artículo explora cómo la IA puede aprovechar la información recopilada por los sistemas de monitoreo de las redes hidráulicas para localizar fallas con mayor precisión, reducir el desperdicio de agua y optimizar la gestión de los recursos hídricos. Además, presenta ejemplos de estrategias innovadoras que combinan modelos digitales y aprendizaje automático para enfrentar este problema. Comprender estas tecnologías permite vislumbrar nuevas oportunidades para proteger un recurso esencial para la sociedad y avanzar hacia un uso más eficiente y sustentable del agua.

Introducción

“Gota a gota, el agua se agota”, advertía una popular campaña publicitaria promovida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a finales de los años ochenta. Esa campaña buscaba concientizar a la población sobre la importancia de cuidar hasta la más mínima gota de agua, anticipando una posible escasez. Sin embargo, 40 años después de aquella campaña, México sigue enfrentando un serio problema relacionado con sus recursos hídricos: de cada 10 litros de agua que se utilizan, 4 se desperdician [1].

En 2006, el Banco Mundial (World Bank Group, WBG) [1] estimó que, a nivel global, aproximadamente el 35 % del agua distribuida a través de las redes de distribución se perdía. Estas estimaciones se realizaron considerando los países en desarrollo y se traducían en una pérdida de aproximadamente 45 millones de metros cúbicos (m³) diarios. Esa cantidad de agua llenaría más de 25 estadios Azteca. Estimaciones más recientes, como las realizadas por Liemberger y Wyatt [2], son menos conservadoras y calculan que las pérdidas diarias ascienden a 256 millones de m³ en los países en desarrollo (más de 143 estadios Azteca) y a 69.1 millones de m³ en América Latina y el Caribe (más de 38 estadios Azteca).

En México, las cifras estimadas son de aproximadamente 12.5 millones de m³ diarios (más de 7 estadios Azteca), lo que representa el 40 % del total de agua enviada a través de las redes de distribución. Estas cifras contrastan con la realidad de los países desarrollados, donde la pérdida es de aproximadamente el 20 %, con algunos casos, como Países Bajos y Dinamarca, donde no excede el 7 %. La Tabla 1 presenta un comparativo del desperdicio de agua por día para algunos países en desarrollo (Brasil, Nigeria y México), así como para algunos países desarrollados (Alemania, China, Dinamarca, Estados Unidos de América y Países Bajos).

Tabla 1. Cifras estimadas de agua desperdiciada para algunos países [2].

País	Agua desperdiciada (m³/día)	Porcentaje de agua desperdiciada
Alemania	2,030,621	15 %
Brasil	18,872,182	39 %
China	44,688,202	21 %
Dinamarca	69,888	7 %

País	Agua desperdiciada (m³/día)	Porcentaje de agua desperdiciada
Estados Unidos de América	39,068,076	20 %
Nigeria	738,259	39 %
México	12,425,811	40 %
Países Bajos	146,196	5 %

Por otra parte, en el estado de Chihuahua, las pérdidas de agua representan un desafío crítico para la sostenibilidad hídrica. De acuerdo con la CONAGUA, el estado presenta una eficiencia física del 52 % [3, p. 66]. Esto implica que el 48 % del volumen total inyectado a la red de distribución no llega a ser contabilizado, lo cual se atribuye, en parte, a fugas físicas en el sistema. Dado que la mayor parte de la infraestructura se encuentra bajo tierra, es de esperarse que la localización de fugas sea una tarea extenuante y costosa.

Los métodos convencionales combinan el monitoreo de la red con la inspección visual de las tuberías. Este enfoque suele ser lento y propenso a errores de interpretación. En este contexto, la inteligencia artificial (IA), una tecnología capaz de identificar patrones y tomar decisiones a partir de grandes cantidades de datos, emerge como una herramienta eficiente. Ha demostrado su utilidad, por ejemplo, en la predicción de sequías mediante el análisis de imágenes satelitales. Además, se utiliza para estimar la demanda hídrica, monitorear la calidad del agua y optimizar el riego agrícola. Sin embargo, la efectividad de la IA depende de la información que recibe. Para conocer los datos que pueden utilizarse en la detección de fugas, primero es necesario comprender, de manera general, cómo funcionan los sistemas hidráulicos modernos.

Sistemas de distribución de agua

Los componentes principales de las redes de distribución de agua en zonas urbanas son el sistema de almacenamiento de agua tratada, las estaciones de bombeo y la red de tuberías para la distribución. En la Figura 1 se muestra una versión simplificada de un sistema moderno de distribución de agua que incluye elementos como pozos, bombas, unidades de monitoreo, sensores de presión, tanques de almacenamiento y medidores de consumo, diseñados para satisfacer las necesidades residenciales, agrícolas e industriales.

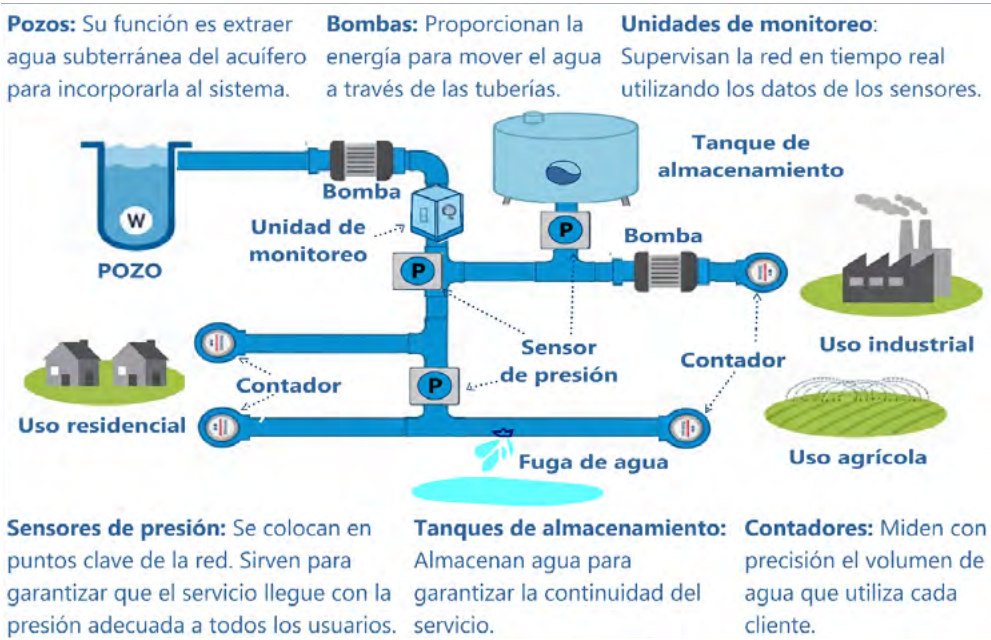


Figura 1. Representación simplificada de un sistema moderno de distribución de agua.

Para calcular la pérdida de agua se utiliza la métrica denominada “agua no contabilizada”, que corresponde a la diferencia entre el agua que se inyecta al sistema y la que finalmente registran los medidores de los usuarios. Por ejemplo, si el sistema de distribución envía 1,000 litros a la red y solo se contabilizan 600 en los medidores, se registra una pérdida de 400 litros; es decir, un 40 % del agua se pierde en el trayecto. No obstante, reducir esta cifra requiere pasar del simple diagnóstico a la localización precisa, un reto que demanda, en primera instancia, modelar la red de distribución para comprender su comportamiento hidráulico a partir de la topología de sus componentes y de las leyes físicas que gobiernan el flujo.

Al ser la red de tuberías el elemento más abundante de un sistema de distribución, también es el más susceptible a fallos. Además, estas tuberías están expuestas a condiciones adversas derivadas del entorno urbano. En Chihuahua, la mayoría de las tuberías se encuentran enterradas. Detectar fugas mediante inspección visual resulta prácticamente imposible, salvo cuando la fuga es tan grande que logra remover la tierra circundante. Para fines prácticos, la red puede simplificarse y representarse como un grafo dirigido. Un grafo es una estructura matemática formada por nodos (puntos) y aristas (conexiones) que permiten representar relaciones entre distintos elementos.

Esta representación permite simplificar la red y centrarse únicamente en:

- Nodos: puntos de unión, consumo, tanques, pozos, bombas, válvulas y otros elementos de la red.
- Aristas: tuberías que conectan los nodos.

La representación en forma de grafo de la red mostrada en la Figura 1 se presenta en la Figura 2. Los nodos sin sensor aparecen en color azul, mientras que aquellos con sensor de presión aparecen en color verde. Con esta simplificación puede deducirse que la cantidad de agua que sale de un nodo debe ser igual a la suma del agua que entra a los nodos adyacentes. Si se observa una diferencia, puede inferirse la presencia de una fuga en alguno de los nodos involucrados o en alguna de las tuberías que los conectan, lo que limita el área de búsqueda.

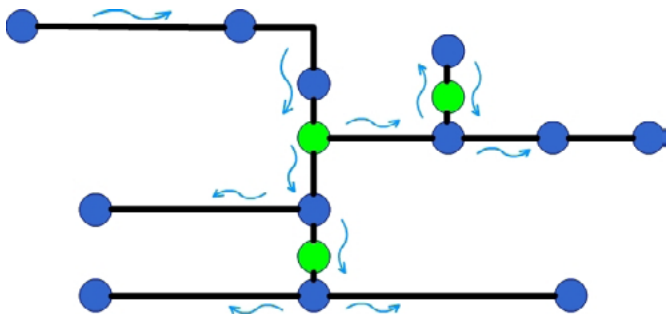


Figura 2. Grafo dirigido de un sistema moderno de distribución de agua basado en la red mostrada en la Figura 1.

En la práctica, las métricas más utilizadas en las redes de distribución de agua son el caudal (cantidad de agua que circula por unidad de tiempo, generalmente expresada en litros por segundo) y la presión (fuerza que ejerce el agua sobre las paredes de la tubería). Una presión demasiado baja impide que el agua llegue adecuadamente a todos los usuarios, mientras que una presión excesiva puede dañar las tuberías y otros componentes de la red.

Existe una relación directa entre la presión del agua y su caudal o flujo. En una tubería cerrada y sin fugas, si ningún usuario consume agua, no existe flujo y la presión permanece estable. Sin embargo, cuando se abre una llave o se produce una fuga, el agua comienza a desplazarse por la tubería, lo que provoca una caída de presión. Entonces surge una pregunta fundamental: ¿cómo determinar si esa caída de presión se debe a una fuga o simplemente al consumo normal de los usuarios?

Una estrategia común consiste en asumir que, para un tramo de red con múltiples usuarios, la caída de presión debe mantenerse dentro de un rango habitual. Por ello, suele analizarse el comportamiento de la presión durante las horas de menor demanda, bajo la premisa de que las variaciones observadas en esos periodos podrían atribuirse a fugas. Sin embargo, en condiciones reales, la cantidad de sensores de presión suele ser mucho menor que la cantidad de nodos presentes en la red, lo que dificulta considerablemente la localización precisa de las fugas.

Agregar más sensores a una red hidráulica extensa y compleja podría parecer una solución evidente, pero no necesariamente es la más conveniente. La adquisición e instalación de sensores requiere una inversión significativa y, además, incrementa los costos asociados al mantenimiento, la operación y el monitoreo continuo. Por esta razón, el objetivo principal es aprovechar al máximo la infraestructura ya existente.

En este contexto cobran importancia los sistemas de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés de Supervisory Control and Data Acquisition). Los sistemas SCADA permiten supervisar y controlar de manera remota distintos elementos de la red, como bombas y válvulas, además de monitorear y almacenar variables históricas como la presión, el flujo y la calidad del agua [4].

En una red hidráulica moderna pueden operar miles de sensores de manera simultánea. Cada uno de ellos envía periódicamente sus lecturas a los sistemas SCADA, generando enormes volúmenes de datos. Sin embargo, existe una diferencia fundamental entre datos e información. Los datos son registros aislados, mientras que la información surge cuando esos datos adquieren contexto y significado útiles para la toma de decisiones. Al proceso de extraer información valiosa a partir de grandes conjuntos de datos se le conoce como minería de datos.

Es precisamente en esta transformación de datos en información donde la inteligencia artificial ha adquirido una gran relevancia, convirtiéndose en una de las herramientas más poderosas para la minería de datos. La IA permite automatizar la conversión de grandes volúmenes de datos en información útil y accionable. En el caso particular de las redes hidráulicas, ha demostrado ser capaz de reducir el área de búsqueda de fugas e incluso detectar anomalías en tiempo real.

De los datos a la información: cómo se utiliza la IA en la detección de fugas

Modelar con exactitud el comportamiento de una red hidráulica es una tarea extremadamente compleja. Esto se debe a la variabilidad de sus condiciones de operación, al envejecimiento progresivo de la infraestructura y a la existencia de numerosas variables desconocidas, como los consumos reales no medidos y las fugas que pasan inadvertidas. Ante este escenario de incertidumbre, la IA busca facilitar la comprensión del sistema mediante el aprendizaje a partir de su historial operativo.

La definición de inteligencia artificial es amplia e incluye todos aquellos algoritmos diseñados para realizar tareas que normalmente requieren capacidades cognitivas humanas, como el razonamiento, el aprendizaje, la memoria o la atención. Estas capacidades permiten resolver problemas y tomar decisiones. Sin embargo, la IA no intenta reproducir completamente el comportamiento humano, sino emular aquellas funciones específicas necesarias para resolver una tarea o automatizar un proceso.

Como resultado, la IA puede dividirse en diversas subramas según el objetivo que persiguen. Entre las más conocidas se encuentran la robótica, el procesamiento del lenguaje natural, la visión artificial y el aprendizaje automático (Machine Learning, ML). El aprendizaje automático es una rama de la IA que permite identificar patrones de forma automática a partir de datos históricos. Debido a esta capacidad, es una de las herramientas más adecuadas para abordar el problema de la detección de fugas en redes hidráulicas.

Aunque formalmente un algoritmo se define como una secuencia lógica de instrucciones que transforma una entrada en una salida, en el aprendizaje automático su función principal es

identificar patrones y relaciones estadísticas dentro de los datos históricos. En este contexto, resulta importante distinguir entre algoritmo y modelo. El algoritmo corresponde al procedimiento de aprendizaje, mientras que el modelo es el resultado final de dicho proceso, es decir, una representación matemática cuyos parámetros han sido ajustados para realizar una tarea específica. En términos prácticos, los algoritmos de ML se utilizan para entrenar modelos capaces de transformar datos en información útil para la toma de decisiones.

El aprendizaje de los modelos ocurre durante la etapa de entrenamiento, en la cual se ajustan sus parámetros internos. Este proceso puede compararse con la mezcla de colores: el algoritmo combina y modifica gradualmente colores básicos —equivalentes a sus parámetros— hasta que la mezcla obtenida se aproxima lo más posible al color deseado, que representa la salida esperada. Este procedimiento se repite numerosas veces y sobre grandes cantidades de datos, permitiendo que el algoritmo identifique los patrones más relevantes.

En la Figura 3 se muestra el proceso general de entrenamiento de un modelo de aprendizaje automático. Las entradas representan ejemplos conocidos, mientras que las salidas esperadas se comparan con las predicciones generadas por el modelo para calcular un error. Posteriormente, ese error se utiliza para ajustar los parámetros internos del modelo y mejorar su desempeño.

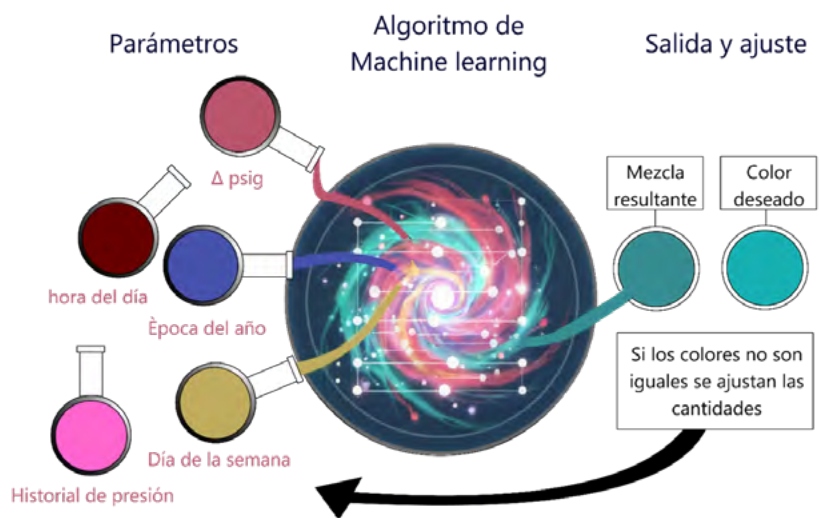


Figura 3. Proceso de entrenamiento de un modelo de aprendizaje automático. Creada mediante el rediseño manual de elementos generados por IA (Gemini de Google, 2026).

Es importante señalar que los algoritmos de aprendizaje automático se dividen generalmente en supervisados y no supervisados. Los algoritmos supervisados, como el representado en la Figura 3, utilizan etiquetas que relacionan los datos de entrada con una respuesta o evento específico; es decir, trabajan con pares de dato-respuesta. Por su parte, los algoritmos no supervisados carecen de estas etiquetas y se enfocan en identificar similitudes entre los datos para formar grupos, detectar anomalías o generar representaciones más compactas de la información. A pesar de estas diferencias, ambos enfoques comparten un principio fundamental: aprender patrones a partir de los datos. Por ello, la calidad de los datos y la forma en que se representan son elementos clave para desarrollar estrategias efectivas de detección de fugas mediante aprendizaje automático.

La importancia de las representaciones puede observarse en investigaciones como la realizada por Irofti y colaboradores [5]. En su estudio, los autores utilizaron una representación de la red hidráulica en forma de grafo para simular distintos escenarios de fuga. A partir de estas simulaciones identificaron patrones característicos asociados a diferentes ubicaciones de fuga. Su metodología está diseñada para redes con una cantidad limitada de sensores y considera los consumos esperados de los usuarios. Como consecuencia, una parte importante del procedimiento consiste en estimar las presiones en los nodos que no cuentan con sensores a partir de

la información disponible en los nodos instrumentados. A pesar de esta limitación, el método logra localizar fugas dentro de un área máxima de dos nodos de distancia con una precisión cercana al 98 %.

Otros enfoques emplean el concepto de gemelos digitales para la gestión de redes hidráulicas [6], [7]. Un gemelo digital es una representación virtual de una infraestructura real que integra información sobre su estructura, sus componentes y su comportamiento operativo. En el caso de las redes hidráulicas, estos modelos virtuales se complementan con herramientas de IA capaces de predecir estados futuros de la red a partir de los datos históricos y de los patrones aprendidos durante el entrenamiento.

Si el comportamiento observado en la red real difiere significativamente del comportamiento predicho por el gemelo digital, puede inferirse la presencia de una fuga o de alguna otra anomalía operativa. De esta manera, el sistema no solo permite monitorear el estado actual de la infraestructura, sino también anticipar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas mayores.

La principal ventaja de la IA radica en su capacidad para aprender directamente de los datos históricos de operación. Esto permite mejorar la detección y el diagnóstico de fugas, además de favorecer la identificación temprana de zonas vulnerables dentro de la red. En consecuencia, la IA debe entenderse como una herramienta complementaria que aprovecha la información recopilada por los sistemas SCADA y se integra con los modelos hidráulicos convencionales para fortalecer la gestión de los recursos hídricos.

Conclusiones y futuro del monitoreo inteligente

Las redes hidráulicas modernas operan bajo condiciones cambiantes y están sujetas a un desgaste continuo provocado por el uso, el envejecimiento de los materiales y el crecimiento urbano. Debido a que gran parte de esta infraestructura se encuentra enterrada, la detección de fugas mediante inspección visual resulta poco práctica y, en muchos casos, imposible. Por ello, reducir el desperdicio de agua requiere la implementación de tecnologías que permitan detectar fallas con mayor rapidez y localizar con precisión las zonas afectadas.

La disponibilidad de grandes cantidades de datos históricos y operativos, proporcionados por los sistemas SCADA, convierte a la inteligencia artificial en una herramienta especialmente adecuada para la detección de fugas en redes hidráulicas. Esta tendencia representa una evolución natural de los sistemas actuales, al combinar el carácter reactivo de los métodos tradicionales con las capacidades predictivas de la IA. Como resultado, es posible avanzar más allá de la simple detección de fallas y acercarse al diagnóstico automático, la localización precisa de anomalías y la identificación proactiva de áreas vulnerables dentro de la red.

Sin embargo, la eficacia de estas tecnologías depende directamente de la calidad, cantidad y disponibilidad de los datos. Aunque existen numerosos estudios que demuestran el potencial de la IA para mejorar la gestión de las redes hidráulicas, son relativamente pocos los que documentan implementaciones reales a gran escala. Además, cada sistema de distribución presenta características particulares relacionadas con su infraestructura, patrones de consumo y condiciones de operación, por lo que resulta necesario realizar análisis específicos para determinar cuáles tecnologías son las más adecuadas en cada caso.

En el estado de Chihuahua, la implementación de metodologías que permitan optimizar el uso del agua constituye un elemento central de los planes hídricos de mediano y largo plazo. En este contexto, desarrollar mecanismos eficientes para la detección de fallas en la red hidráulica es una necesidad ineludible. Reducir el desperdicio de agua es fundamental para garantizar una gestión sustentable de este recurso estratégico. Se trata de un desafío que debe asumirse de manera colectiva, combinando innovación tecnológica, planeación y participación social para conservar el agua, gota a gota.

Referencias

- [1] B. Kingdom, R. Liemberger y P. Marin, “The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries - how the private sector can help: a look at performance-based service contracting,” World Bank, Washington, DC, USA, dic. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://documents.worldbank.org/curated/en/385761468330326484>
- [2] R. Liemberger y A. Wyatt, “Quantifying the global non-revenue water problem,” *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 19, no. 3, pp. 831–837, abr. 2019. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>
- [3] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento, edición 2025, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, México, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento>
- [4] S. A. Boyer, SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition, 3.^a ed. Research Triangle Park, NC, Estados Unidos: International Society of Automation, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.isa.org/products/scada-supervisory-control-and-data-acquisition>
- [5] P. Irofti, L. Romero-Ben, F. Stoican y V. Puig, “Learning dictionaries from physical-based interpolation for water network leak localization,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 755–766, may. 2024. doi: <https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3329696>
- [6] S. Jun y D. Jung, “Exploration of deep learning leak detection model across multiple smart water distribution systems: Detectable leak sizes with AMI meters,” *Water Research X*, vol. 29, p. 100332, abr. 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100332>
- [7] T. A. Syed, M. A. Muhammad, A. A. AlShahrani, M. Hammad y M. T. Naqash, “Smart water management with digital twins and multimodal transformers: A predictive approach to usage and leakage detection,” *Water*, vol. 16, no. 23, p. 3410, nov. 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/w16233410>



CIENCIAS BÁSICAS

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026

<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.bas.01>
e0402BAS01

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UACJ
ISSN: 2601-9946

Energía del desierto, supercapacitores flexibles a base de nopal

Karen Ayala Martinez¹

Mtro. Jorge Arredondo-Espínola²

Dr. Noé Arjona³

Dra. Minerva Guerra Balcázar^{4*}

¹ Universidad Autónoma de Querétaro

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados

³ Centro de Investigación en Materiales Avanzados
<https://orcid.org/0000-0002-4136-4738>

⁴ Universidad Autónoma de Querétaro <https://orcid.org/0000-0002-0650-335X>

RESUMEN

El almacenamiento de energía proveniente de fuentes renovables, como el sol y el viento, representa uno de los principales desafíos tecnológicos actuales. Una alternativa prometedora son los supercapacitores, dispositivos capaces de cargarse rápidamente y liberar energía de forma eficiente. En este contexto, el nopal ha despertado interés científico debido a que puede transformarse en biocarbón, un material conductor con propiedades adecuadas para fabricar supercapacitores flexibles utilizados en dispositivos electrónicos y tecnologías portátiles. Además de aprovechar un recurso abundante y de bajo impacto ambiental, esta propuesta contribuye al desarrollo de sistemas energéticos más sostenibles y accesibles. El uso del nopal no solo reduce residuos agrícolas, sino que también impulsa nuevas aplicaciones para las energías renovables en regiones áridas y con escasez de agua. Este artículo explora cómo una planta emblemática de México podría convertirse en parte clave de las tecnologías energéticas del futuro.

Introducción

El avance tecnológico ha tenido como resultado la búsqueda del confort en la vida del ser humano, mejorando la calidad de vida y facilitando las actividades diarias. Esto ha revolucionado el transporte, la comunicación, el deporte, la medicina y la seguridad. Uno de los mayores avances tecnológicos de la humanidad son los sistemas de almacenamiento energético, los cuales hacen posible el desarrollo de dispositivos móviles y estacionarios, como celulares, computadoras, glucómetros, vehículos eléctricos y sistemas de respaldo eléctrico, entre otros. Debido a la gran capacidad que poseen los dispositivos de almacenamiento energético [1], estos representan una alternativa para disminuir las problemáticas ambientales relacionadas con el uso de combustibles fósiles y una solución para resolver la intermitencia de las energías renovables.

Esta intermitencia limita el uso de las tecnologías verdes. Por ejemplo, los sistemas eólicos solo producen energía cuando existen corrientes de aire suficientes para mover las turbinas de los aerogeneradores, limitando su aplicación a zonas específicas y generando energía de forma inconstante, la cual puede desperdiciarse cuando no se utiliza. Por este motivo, se buscan nuevas formas de almacenamiento energético que permitan conservar la energía generada por los sistemas renovables y mantener un flujo constante de energía (Figura 1).



Figura 1. Esquema representativo de las energías renovables (solar, hidrica, eólica y térmica) y las alternativas para solventar la intermitencia de estos sistemas.

Existen diferentes sistemas de almacenamiento energético que ayudan al proceso de descarbonización del planeta; entre ellos destacan las baterías y los capacitores. En el caso de las baterías, los sistemas de iones de litio son los más utilizados, ya que poseen una alta capacidad específica, permitiendo almacenar una gran cantidad de energía y suministrarla durante largos periodos de tiempo. Por otro lado, los capacitores son considerados sistemas

de alta potencia, ya que pueden proveer altas densidades de energía en poco tiempo y recargarse rápidamente [2].

Es importante mencionar que las baterías de ion-litio pueden recargarse hasta 3000 veces, presentando un deterioro gradual del sistema, mientras que los capacitores suelen operar entre 2000 y 20 000 ciclos con una disminución aproximada de 10 % de su capacidad energética [3]. Aunque estos sistemas suelen compararse, también permiten el desarrollo de tecnologías duales e híbridas que maximizan sus aplicaciones y optimizan su tiempo de vida. Un ejemplo son los vehículos eléctricos, los cuales incorporan capacitores para el frenado regenerativo, aumentando la autonomía del sistema de almacenamiento energético hasta en un 25 % y prolongando la vida útil de las baterías hasta 10 veces [4]. Asimismo, la incorporación de capacitores en elevadores puede reducir el gasto energético hasta en un 70 %, disminuyendo costos de operación en edificios comerciales, hospitales y aeropuertos [5].

La ciencia detrás de los supercapacitores

El mundo de los capacitores es bastante amplio, existiendo capacitores convencionales y capacitores electroquímicos, entre ellos los capacitores electrolíticos, supercapacitores y pseudocapacitores. Estos dispositivos se componen de dos electrodos (materiales conductores de electrones) y un medio separador, diferenciándose principalmente por su funcionamiento y componentes.

Por un lado, los capacitores convencionales se componen de electrodos elaborados con láminas metálicas separadas por un material aislante llamado dieléctrico, lo que permite almacenar una cantidad limitada de carga [6]. Por otro lado, los capacitores electroquímicos incorporan un electrolito (sustancia que contiene iones y permite conducir electricidad) y poseen una mayor capacidad de almacenamiento.

Los supercapacitores incorporan dos electrodos elaborados con materiales altamente porosos, principalmente carbones modificados como grafeno y nanotubos de carbono, separados por un electrolito [7]. Para comprender la diferencia entre un supercapacitor y un capacitor electrolítico, se debe considerar el cambio en el área real de los electrodos. Mientras que una lámina metálica posee una superficie relativamente plana, los materiales porosos incrementan sustancialmente el área disponible gracias a la presencia de poros, rugosidad y tamaño de partícula. Esto genera más zonas donde los iones del electrolito pueden adsorberse, aumentando así la capacitancia específica ($F\ g^{-1}$, cantidad de carga almacenada por gramo de material), como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Esquema comparativo entre un capacitor electrolítico y un supercapacitor, detallando la diferencia en la estructura de los electrodos y su influencia en la adsorción de iones.

Asimismo, existen los pseudocapacitores, los cuales combinan características de las baterías y los capacitores. A diferencia de los capacitores convencionales, que no llevan a cabo reaccio-

nes químicas ni electroquímicas durante su funcionamiento, los pseudocapacitores aprovechan reacciones similares a las presentes en las baterías para aumentar el número de cargas y el potencial del sistema [8].

Biocarbones: energía a partir de residuos orgánicos

Los supercapacitores han ganado gran relevancia en la comunidad científica debido al interés por desarrollar electrodos elaborados con carbones porosos, nanoestructurados y con gran estabilidad electroquímica, propiedades que determinan su capacidad de almacenamiento energético y tiempo de duración. Además, se han impulsado investigaciones para obtener carbón a partir de materia orgánica de desecho, como grano de café, cáscara de coco, cáscara de plátano y bagazo de agave, entre otros. Esto permite disminuir costos de fabricación, reducir la huella de carbono y minimizar la toxicidad ambiental [9].

El uso de nopal ha tomado gran importancia para el desarrollo de supercapacitores, debido a su adaptabilidad a temperaturas y entornos extremos, así como a su bajo consumo de agua. Estas características posicionan al nopal como un excelente candidato para proyectos de reforestación y economía circular en regiones áridas y semiáridas, principalmente en México, África y Oceanía.

Una de las principales inquietudes al emplear alimentos como materia prima es el posible aumento en el precio de la canasta básica, impactando negativamente a la población. Sin embargo, este factor se descarta en el caso del nopal, ya que en México se desecha aproximadamente el 63 % de su producción debido a la sobreproducción (SEDESOL, 2018) [10]. Esto representa una oportunidad para desarrollar sistemas de almacenamiento energético con bajo impacto ambiental y social, sin necesidad de extraer materias críticas.

¿Por qué usar nopal?

Debido a su naturaleza orgánica, el nopal presenta altos contenidos de carbono y, en menor proporción, heteroátomos (átomos distintos al carbono presentes en la estructura) como oxígeno, azufre, nitrógeno, fósforo, magnesio, aluminio y silicio. En ingeniería de materiales, la incorporación de otros elementos dentro de la estructura del carbono genera irregularidades llamadas defectos, los cuales podrían afectar negativamente algunas propiedades. No obstante, un nivel controlado de estos defectos puede ser beneficioso, ya que permite optimizar características como la resistencia a la corrosión, el aumento del área superficial y la estabilidad mecánica y química.

Para obtener biocarbones, la materia orgánica es sometida a un tratamiento térmico en atmósfera inerte, proceso conocido como carbonización. Mediante el control de parámetros como tiempo y temperatura, es posible modular el grado de defectos presentes en el material.

Del nopal al biocarbón conductor

El biocarbón a base de nopal fue obtenido mediante la deshidratación de pencas de nopal, las cuales posteriormente fueron molidas mecánicamente. Una vez molido, el material fue tratado térmicamente en un rango de temperaturas de 600 a 900 °C en atmósfera de nitrógeno, permitiendo la obtención de un carbón conductor y favoreciendo la evaporación de residuos orgánicos, lo que genera poros y aumenta el área superficial [11]. Finalmente, el biocarbón fue so-

metido a un proceso de activación química en medios ácidos y básicos con la finalidad de modificar su estructura morfológica y química [12], mejorando así sus propiedades electroquímicas.

Supercapacitores flexibles: la electrónica del futuro

Uno de los sistemas más novedosos en el campo de los supercapacitores son los dispositivos flexibles. Este tipo de supercapacitores amplía las aplicaciones de los capacitores rígidos, permitiendo el desarrollo de electrónica vestible y biosensores, entre otras tecnologías. Mediante la incorporación de supercapacitores en el recubrimiento de cables eléctricos, es posible optimizar el espacio y reducir la necesidad de módulos independientes de almacenamiento energético.

El desarrollo de sistemas flexibles presenta nuevos retos. Por un lado, los electrodos de carbón deben ser mecánicamente estables para soportar torsiones, estiramientos y flexiones sin comprometer su desempeño. Por otro lado, el uso de electrolitos cuasi sólidos, es decir, películas poliméricas con alta capacidad de adsorción de electrolito, puede mejorar el desempeño del dispositivo, pero también comprometer su estabilidad dimensional y mecánica, llegando a romperse o deformarse y afectando negativamente el rendimiento del capacitor [13].

La Figura 3 muestra el proceso de obtención de biocarbón a partir de nopal como materia prima. A través de un tratamiento térmico controlado, se generan estructuras carbonosas con propiedades conductoras, porosas y nanoestructuradas, además de un grado específico de defectos. Estas características contribuyen a mejorar el desempeño electroquímico del material, haciéndolo adecuado para su aplicación en supercapacitores flexibles (Figura 3).

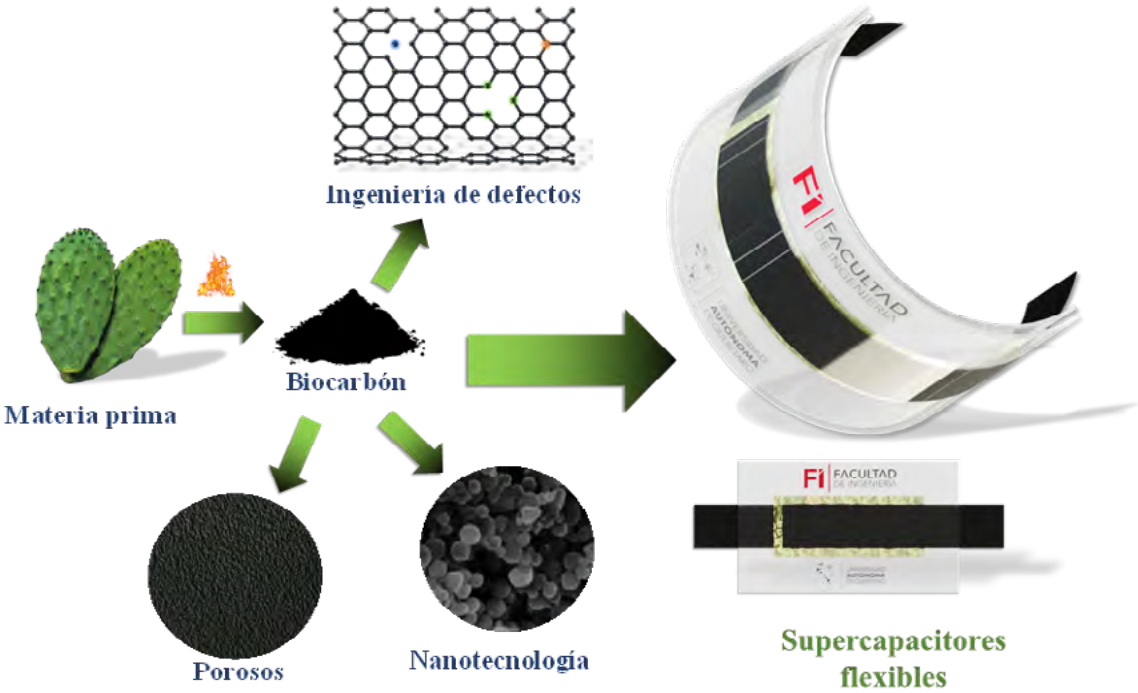


Figura 3. Proceso de elaboración de supercapacitores flexibles a partir de nopal.

Conclusión

Los supercapacitores flexibles elaborados a base de biocarbón de nopal representan una alternativa viable y sostenible para disminuir el impacto ambiental asociado al desarrollo de sistemas de almacenamiento energético. Esta propuesta no compromete la economía de la sociedad y contribuye a reducir los residuos derivados del cultivo de nopal. Además, su aplicación puede extenderse a regiones del mundo con problemas hídricos o condiciones climáticas extremas.

Referencias

- [1] T. Lei, Z. Yang, Z. Lin y X. Zhang, "State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 6, pp. 1488–1503, jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.03.013>.
- [2] M. Winter y R. J. Brodd, "What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?," *Chemical Reviews*, vol. 104, no. 10, pp. 4245–4269, oct. 2004, doi: <https://doi.org/10.1021/cr020730k>.
- [3] L. Chen et al., "Ultrahigh-performance hybrid supercapacitors based on sodium sulfate template-derived electrodes with surface modulation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 456, p. 141166, ene. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141166>.
- [4] "Investigadores de la NASA y UCF idean una carrocería supercondensadora, más autonomía y potencia sin añadir peso," *Forococheseléctricos*, 2022. [En línea]. Disponible en: [Forococheselectricos](https://forococheselectricos.com)
- [5] "Así funciona el KERS de los ascensores, con supercondensadores que recuperan y almacenan la energía cinética," *Forococheseléctricos*, 2024. [En línea]. Disponible en: [Forococheselectricos](https://forococheselectricos.com)
- [6] Z. Ahmad, M. K. Abdullah, M. Z. Ali y M. A. Md Zawawi, "Basic electronic," en *Polymers in Electronics*, 2023, pp. 225–271, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-98382-2.00006-5>.
- [7] M. Kaleem Shabbir, A. S. Syed y J. Akhtar, "Smart multifunctional polymeric inks for supercapacitor applications," en *Smart Multifunctional Nano-inks: Fundamentals and Emerging Applications*, 2023, pp. 429–449, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91145-0.00028-1>.
- [8] M. Sarno, "Nanotechnology in energy storage: the supercapacitors," *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 179, pp. 431–458, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64337-7.00022-7>.
- [9] Z. W. Ma, H. Q. Liu y Q. F. Lü, "Porous biochar derived from tea saponin for supercapacitor electrode: Effect of preparation technique," *Journal of Energy Storage*, vol. 40, p. 102773, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102773>.
- [10] M. M. López Flores y J. M. Omaña Silvestre, "Modelo de desarrollo para el aprovechamiento de nopal verdura en Milpa Alta, Ciudad de México," *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, vol. 20, no. 4, pp. 408–424, 2023, doi: <https://doi.org/10.22231/asyd.v20i4>.
- [11] S. Li, Y. Xu, X. Jing, G. Yilmaz, D. Li y L. S. Turng, "Effect of carbonization temperature on mechanical properties and biocompatibility of biochar/ultra-high molecular weight polyethylene composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 196, p. 108120, sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108120>.
- [12] B. Díaz, A. Sommer-Márquez, P. E. Ordoñez, E. Bastardo-González, M. Ricaurte y C. Navas-Cárdenas, "Synthesis Methods, Properties, and Modifications of Biochar-Based Materials for Wastewater Treatment: A Review," *Resources*, vol. 13, no. 1, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/resources13010008>.

[13] Z. Yan, S. Luo, Q. Li, Z. S. Wu y S. Liu, “Recent Advances in Flexible Wearable Supercapacitors: Properties, Fabrication, and Applications,” *Advanced Science*, vol. 11, no. 8, p. 2302172, feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202302172>.



CIENCIAS BÁSICAS

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026
<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.bas.02>
e0402BAS02

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UACJ
ISSN: 2655-7944

k-NN, la eficiencia de compararte

con tus vecinos

Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez^{*1}

Estefanía Espinosa Fernández²

Mtra. Gabriela Yáñez Pérez³

Dra. Dolores García Toral⁴



^{*1} Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://orcid.org/0000-0002-4980-1832>. manuel.vazquez@correo.buap.mx

² Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://orcid.org/0009-0005-2374-7048>

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://orcid.org/0000-0002-4529-5995>

⁴ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://orcid.org/0000-0001-7944-4242>

RESUMEN

Este artículo explica de manera clara y accesible cómo funciona el método k-NN (k-nearest neighbors o “k vecinos cercanos”) para imputar, es decir, rellenar datos faltantes en registros obtenidos a lo largo del tiempo. A través de ejemplos y explicaciones sencillas, se describen los conceptos principales involucrados en su implementación computacional, así como los términos técnicos necesarios para comprender su funcionamiento sin requerir conocimientos especializados. El texto también analiza por qué este método ha ganado relevancia frente a técnicas tradicionales, destacando su capacidad para mejorar la precisión en el manejo de información incompleta. Este tipo de herramientas resulta especialmente útil en áreas donde los datos son fundamentales, como la ciencia, la ingeniería, la medicina o el análisis ambiental. Además de presentar los fundamentos del algoritmo, el artículo busca acercar al lector al mundo del aprendizaje automático (Machine Learning), mostrando cómo la inteligencia artificial puede ayudar a resolver problemas reales de forma práctica y eficiente.

Introducción

La inteligencia artificial (IA) y el Machine Learning (ML, aprendizaje automático) son herramientas ampliamente utilizadas en diversas áreas del conocimiento, con aplicaciones que van desde algoritmos para redes sociales hasta análisis de imágenes médicas. Cada vez es más común que las personas tengan contacto con este tipo de recursos, especialmente en ámbitos relacionados con el entretenimiento. Aunque parezca difícil acceder a ellos, lo cierto es que el procedimiento para trabajar con ML es más simple de lo que parece: el sistema se alimenta con un conjunto de entrenamiento (los primeros datos con los que tiene contacto) que utiliza para aprender, para luego generar un modelo a partir de este y evaluarlo con un conjunto de prueba (datos separados previamente para medir el desempeño del modelo).

Una de las razones por las que la inteligencia artificial ha encontrado un espectro tan amplio de aplicaciones es la variedad de algoritmos que engloba. Si bien los principios de funcionamiento son similares, los sistemas de inteligencia artificial están contruidos de distintas maneras y constantemente se buscan implementar mejoras a los métodos existentes. Muchas veces las técnicas se inspiran en elementos preexistentes: algunos ejemplos interesantes son las redes neuronales (basadas en las células del cerebro) y los árboles de decisión (inspirados en los árboles reales y sus raíces, ramas y hojas). Incluso existen algoritmos basados en regresión lineal o sistemas de recompensa y castigo. Sin duda, uno de los más intuitivos y fáciles de aplicar es k-NN (k-nearest neighbors o k-vecinos cercanos).

En este artículo se expone información importante sobre dicho algoritmo, que además es uno de los más utilizados, simples y antiguos del Machine Learning. Se exploran conceptos relevantes, su funcionamiento, algunas características importantes, cuándo es recomendable utilizarlo y su origen, pues, aunque parezca que la inteligencia artificial es una herramienta reciente, la historia de k-NN demuestra que su aparición se remonta a varias décadas atrás.

Machine Learning

Para comprender a k-NN, es necesario comenzar hablando de inteligencia artificial y Machine Learning. La inteligencia artificial engloba las técnicas que buscan que las máquinas sean capaces de razonar. El Machine Learning, por otro lado, engloba herramientas que, como su nombre lo indica, tienen el objetivo de que las máquinas puedan aprender algo a partir de un conjunto de datos. Es decir, el Machine Learning podría considerarse un tipo de inteligencia artificial.

El aprendizaje de un sistema de Machine Learning puede ser de diferentes tipos: supervisado (se le proporcionan al sistema las soluciones esperadas) o no supervisado (se espera que el sistema aprenda a partir de los mismos datos). También puede clasificarse como parametrizado (los datos siguen una distribución de probabilidad y generan una función matemática) y no parametrizado (los datos no caen dentro de alguna distribución de probabilidad específica y no generan una función matemática). Para entender mejor esto último, puede decirse, a grandes

rasgos, que una distribución de probabilidad es una representación de las probabilidades de que alguna medición ocurra con base en el valor de dicha medición, tal como la famosa curva de campana que describe una gran cantidad de fenómenos naturales.

Dentro de los algoritmos de aprendizaje no parametrizado, uno de los más populares es k-NN (k-nearest neighbors o k-vecinos cercanos) [1], donde la k es un número arbitrario por determinar. Se trata de un algoritmo que utiliza la información perteneciente a k vecinos cercanos para realizar tareas de clasificación o predicción de valores.

Es importante destacar que trabajar con Machine Learning es similar a generar modelos, es decir, realizar abstracciones que permitan analizar y aprovechar la información contenida en un conjunto de datos para predecir eventos futuros.

Origen

La idea de este algoritmo se atribuye a un trabajo de 1951 de Evelyn Fix y J. T. Hodges, altamente relacionado con el campo de la probabilidad. El propósito de los autores era determinar, a partir de observaciones, si un fenómeno se comporta siguiendo una distribución F o una distribución G, mismas que no se conocen en su totalidad y de las cuales solo se cuenta con algunos valores para ciertos puntos.

Al final del reporte, los autores proponen tomar en cuenta solo un número de puntos cercanos, los suficientes para contener k puntos de una muestra combinada entre valores conocidos en F y en G, para realizar el estimado de un nuevo valor dentro de F y utilizar este mismo conjunto de puntos para la estimación de un nuevo valor en G. Una vez que se completan ambos conjuntos de probabilidades por este procedimiento, se determina cuál de las dos distribuciones marca el comportamiento de las mediciones en cuestión. Dado lo anterior, este procedimiento suele considerarse como una primera versión del algoritmo k-NN [2].

Aunque el estudio nunca fue publicado en medios de fácil acceso al público —solo como un reporte interno en una universidad de la Fuerza Aérea de Estados Unidos y recuperado en 1989 para su publicación en una revista especializada—, el algoritmo cobró popularidad gracias a su simplicidad y precisión. Por eso aún se utiliza y, aunque se ha optimizado y modificado a través de la historia, sigue funcionando bajo los mismos principios.

Generalidades

En la literatura se suele clasificar a k-NN como un algoritmo “perezoso”, pues funciona bajo el principio de “con las experiencias viejas, genera datos nuevos”. Es decir, un dato de investigación se compara con los datos de entrenamiento a partir de una medida, en este caso la distancia [3]. Esto también implica que todo el cálculo ocurre cuando se realiza una clasificación o predicción; por ello, el método depende en gran medida de la memoria [4].

Al emplear un algoritmo de inteligencia artificial, es importante definir el tipo de problema que se quiere resolver. Existen dos tipos de tareas: clasificación y regresión. Aunque k-NN fue originalmente diseñado para la clasificación, ha demostrado ser eficiente también para resolver problemas de regresión, lo cual lo convierte en una herramienta sumamente atractiva gracias a su versatilidad y practicidad.

Para resolver un problema de clasificación, se alimenta a la computadora con un conjunto de datos correspondientes a diferentes clases o categorías, a fin de que “aprenda” a diferenciar entre elementos de cada clase. Por ejemplo, fotografías de diferentes tipos de autos: deportivos, sedanes, SUV o camionetas. A partir de este aprendizaje, cuando sea alimentada con un dato nuevo, podrá diferenciarlo y asignarlo a la clase que le corresponda. Siguiendo con el ejemplo de los autos, supongamos que se proporciona a la máquina la fotografía de un Tsuru; la computadora procederá a catalogarlo como un sedán.

El problema de clasificar puede complicarse tanto como sea necesario, dependiendo de la cantidad de información que se necesite extraer del conjunto de datos. En nuestro ejemplo, además del tipo, pueden subclasificarse los autos por marca, modelo, uso particular, empresarial o taxi, número de cilindros del motor, entre otros aspectos.

Por otro lado, la regresión consiste en el análisis de un conjunto de datos a partir del cual se busca encontrar una tendencia y una desviación respecto a ella. Una vez identificadas, es posible calcular una curva o función teórica que permita conocer valores en puntos nuevos o fuera del conjunto inicial. En otras palabras, imaginemos que Pepito, al salir de la escuela, camina hacia su casa y llega en 15 minutos si no se distrae, pero tarda 20 minutos si se detiene a platicar con sus amigos. Como la mayoría de las veces camina directo a casa, el trayecto de 15 minutos representa la tendencia, mientras que la desviación es de 5 minutos. Por lo tanto, si tuviéramos que predecir el tiempo que tardará en llegar a casa, podríamos decir que tardará aproximadamente 15 minutos.

- El algoritmo se compone de tres pasos primordiales:
- Calcular la distancia entre el punto de investigación y los puntos de consulta.
- Encontrar los vecinos cercanos.
- Realizar la clasificación o regresión consultando a los k-vecinos [5].



Figura 1. Tarea de clasificación simple.

La precisión de k-NN puede verse seriamente afectada debido a la presencia de ruido en los datos (variaciones aleatorias que dificultan el análisis, como errores de medición o valores extremos), atributos irrelevantes (variables que no aportan información útil al aprendizaje) o un incorrecto escalado de los atributos (transformación de los datos para que tengan un rango o escala similar, especialmente cuando existen unidades distintas) [6]. Por ello, el preprocesamiento debe realizarse cuidadosamente.

Además, es necesario definir adecuadamente los hiperparámetros, es decir, variables internas del algoritmo que toman valores óptimos para maximizar la precisión de la clasificación o regresión calculadas por k-NN.

Primero, es importante conocer el problema para asegurar una correcta elección del algoritmo. Aunque k-NN puede utilizarse tanto para clasificación como para regresión —siendo más común el primer caso—, su funcionamiento cambia ligeramente: para clasificar, consulta a los puntos cercanos y devuelve la etiqueta que más se repite; en regresión, también consulta a los vecinos cercanos, pero realiza una especie de promedio para predecir un valor.

Definiendo el número de vecinos

Probablemente, el parámetro más importante por definir es el valor de k, es decir, con cuántos vecinos cercanos se comparará el punto de interés. Para establecerlo, es importante tomar en cuenta dos conceptos: sobreajuste (los datos se ajustan tanto al conjunto de prueba que no

logran generalizar correctamente) y subajuste (el modelo no realiza buenas predicciones en absoluto).

Si k es un número muy grande, puede generarse sobreajuste; pero si es demasiado pequeño, el algoritmo podría no tomar en cuenta la tendencia general y convertirse en un mal modelo [6]. Asimismo, a mayores valores de k , más grandes son las clases en cuanto a rango, lo que genera un efecto de reducción de ruido, aunque la clasificación puede resultar menos precisa.



Figura 2. Cinco vecinos más cercanos al punto de consulta.

De manera que k depende del número y tipo de datos. Usualmente se define mediante validación cruzada, que consiste en dividir el conjunto de entrenamiento en dos o más subconjuntos para entrenar y poner a prueba distintos hiperparámetros, con la finalidad de identificar cuál ofrece un mejor desempeño [6]. Adicionalmente, se recomienda utilizar valores impares de k para evitar empates entre clases [7].

También es importante definir la participación de cada vecino, pues el algoritmo puede funcionar de dos maneras: realizar predicciones según el voto de la mayoría o asignar diferentes pesos a los votos dependiendo de la distancia respecto al punto de interés [4].

Distancias

Como el algoritmo consulta puntos cercanos para realizar predicciones, la distancia es otro factor importante por establecer, pues existen diferentes tipos, siendo la más común la euclidiana.

La distancia euclidiana es la más simple de comprender, ya que corresponde directamente a la noción cotidiana de distancia: la línea recta entre el punto de consulta y el punto investigado. También existe la distancia Manhattan, utilizada en situaciones donde es necesario moverse a través de un sistema cuadrículado, de manera similar a como se transita por las calles de una ciudad.

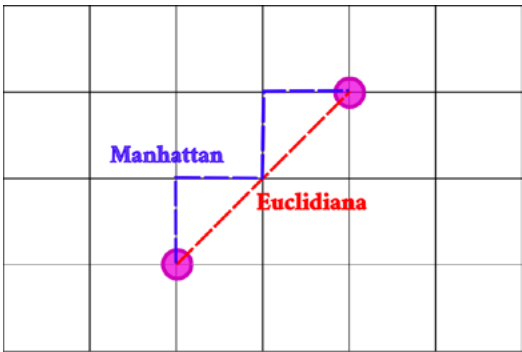


Figura 3. Comparación entre las distancias Manhattan (azul) y euclidiana (rojo).

Otro ejemplo es la distancia Minkowski, en la que se define un parámetro p , lo que la vuelve más flexible. Si $p = 1$, es equivalente a Manhattan; si $p = 2$, es equivalente a la euclidiana [8]. Existen otros tipos de distancia, pero estos tres son los más comunes.

Ventajas y desventajas

Como cualquier algoritmo, k-NN funciona mejor bajo condiciones específicas, por lo que es importante conocer sus ventajas y desventajas para asegurarse de que es una opción viable para tratar el conjunto de datos de interés.

Ventajas:

- Fácil de implementar y comprender.
- Tiene pocos hiperparámetros.
- Puede funcionar bien para clasificación multiclase (instancias con más de una etiqueta).
- Se adapta fácilmente a nuevos datos.

Desventajas:

- Sensible al ruido.
- No escala bien con grandes cantidades de datos.
- No genera como salida un modelo matemático para analizar.
- Alto costo computacional.
- Un mal valor de k puede generar problemas.
- [4], [5], [7]

Con un correcto tratamiento, las desventajas pueden ser superadas por los beneficios de k-NN, por lo que cuenta con múltiples aplicaciones con las que una persona puede encontrarse fácilmente y probablemente con frecuencia.

¿Dónde se utiliza?

Suele utilizarse en tareas que requieren alta precisión y no necesitan como salida una fórmula matemática para ser analizada por un humano. Adicionalmente, es recomendable para conjuntos que no tengan demasiados datos. Algunos casos específicos son:

Algoritmos de recomendación para servicios de streaming.

Reconocimiento facial.

Detección de plagio.

Detección de enfermedades según algunos síntomas sutiles.

Clasificación de individuos según su comportamiento y respuesta a estímulos en áreas como la psicología y la sociología [7].

Implementar este algoritmo tampoco es complicado. Una de las maneras más simples requiere utilizar Python y la biblioteca Scikit-learn, en particular los módulos `KNeighborsClassifier` y `KNeighborsTransformer` (más información en [9]). Aunque es recomendable consultar a detalle la documentación correspondiente, así como los principios básicos de Machine Learning, para obtener resultados coherentes.

Conclusión

Como puede concluirse a partir de lo expuesto, k-NN se ha convertido en un clásico dentro de las herramientas de inteligencia artificial gracias a su practicidad. No obstante, es importante destacar que emplearlo presenta ventajas y desventajas, por lo que resulta fundamental conocer bien el conjunto de datos y el problema que se quiere resolver. Esto no solo permite saber

si es el algoritmo adecuado, sino también ajustar correctamente sus hiperparámetros y obtener resultados satisfactorios.

Referencias

- [1] F. Imam, P. Musilek y M. Z. Reformat, “Parametric and Nonparametric Machine Learning Techniques for Increasing Power System Reliability: A Review”, *Information*, vol. 15, no. 1, p. 37, ene. 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/info15010037>
- [2] B. W. Silverman y M. C. Jones, “E. Fix and J. L. Hodges (1951): An Important Contribution to Nonparametric Discriminant Analysis and Density Estimation: Commentary on Fix and Hodges (1951)”, *International Statistical Review*, vol. 57, no. 3, p. 233, dic. 1989. doi: <https://doi.org/10.2307/1403796>
- [3] H. Díaz-Barrios, Y. Alemán-Rivas, L. Cabrera-Hernández, A. Morales-Hernández, M. Chávez-Cárdenas y G. Casas-Cardoso, “Algoritmos de aprendizaje automático para clasificación de Splice Sites en secuencias genómicas”, *SciELO*, 2015. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992015000400012
- [4] IBM, “What is the k-nearest neighbors algorithm?”, IBM, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/topics/knn>
- [5] J. Sun, W. Du y N. Shi, “A Survey of kNN Algorithm”, *Information Engineering and Applied Computing*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348305327_A_Survey_of_kNN_Algorithm
- [6] R. Nisbet, J. Elder y G. Miner, “Classification”, en *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications*. Elsevier, 2009, pp. 235–258. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374765-5.00011-5>
- [7] United States Artificial Intelligence Institute, “Understanding KNN Algorithm and Its Role in Machine Learning”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.usaii.org/ai-insights/understanding-knn-algorithm-and-its-role-in-machine-learning>
- [8] T. Davi, “Understanding Different Distance Measures”, LinkedIn, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-different-distance-measures-tiago-davi-1f>
- [9] Scikit-learn, “API Reference - sklearn.neighbors: Nearest Neighbors”. [En línea]. Disponible en: <https://scikit-learn.org/stable/modules/classes.html#module-sklearn.neighbors>
- [10] F. Pedregosa et al., “Scikit-learn: Machine learning in Python”, *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf>



CIENCIAS DE LA SALUD

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026

<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.sal.01>

e0402SAL01

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UACJ
ISSN: 2615-9446

La revolución 3D en la medicina:

stents que
desaparecen
y salvan vidas

Ing. Jordi A. Ramirez Meza¹



¹ Universidad Autónoma de
Ciudad Juárez [https://orcid.
org/0009-0008-3138-9764](https://orcid.org/0009-0008-3138-9764).
al250967@alumnos.uacj.mx

RESUMEN

La impresión 3D está transformando la medicina con el desarrollo de stents bioabsorbibles, pequeños dispositivos que mantienen abiertas las arterias y luego se degradan de forma natural dentro del cuerpo. A diferencia de los stents metálicos tradicionales, estos nuevos implantes, fabricados con materiales biodegradables como la policaprolactona y el ácido poliláctico, brindan soporte temporal sin dejar residuos permanentes. El artículo explica cómo la manufactura aditiva permite crear stents personalizados con gran precisión, mejorando sus propiedades mecánicas y reduciendo costos de fabricación. Además, muestra aplicaciones innovadoras en cirugía pancreática, donde los dispositivos pueden adaptarse a la anatomía específica de cada paciente para facilitar procedimientos complejos y disminuir complicaciones. Esta investigación demuestra el enorme potencial de la impresión 3D para impulsar una medicina más personalizada, segura y eficiente, abriendo nuevas posibilidades para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares y otras condiciones que requieren dispositivos médicos avanzados.

Introducción

Imaginen que su cuerpo necesita un pequeño andamio interno para ayudar a sanar una arteria bloqueada. Los tratamientos tradicionales, utilizados desde hace décadas, emplean stents metálicos permanentes (estructuras tubulares hechas de materiales como acero inoxidable o titanio) que permanecen en el cuerpo de manera indefinida. Aunque estos stents son efectivos para mantener la arteria abierta inmediatamente después del procedimiento, su permanencia puede generar problemas a largo plazo, como inflamación vascular, alteración de la función vasomotora (capacidad natural de los vasos sanguíneos para contraerse y relajarse) y un riesgo continuo de complicaciones graves, como la trombosis tardía [3], [4].

El problema es simple: el papel del stent es temporal, limitado a la intervención y al periodo necesario para que la arteria sane y el tejido interno se recupere. Una vez reparado el vaso sanguíneo, el metal se convierte en un cuerpo extraño innecesario [3], [4].

Para superar estas limitaciones, la ciencia médica ha desarrollado los stents bioabsorbibles o biodegradables (BRS, por sus siglas en inglés: *Bioresorbable Scaffolds*). Estos dispositivos están diseñados para brindar soporte mecánico únicamente durante el tiempo necesario para la recuperación del vaso sanguíneo y después disolverse y ser absorbidos por el cuerpo, dejando la arteria libre y recuperando su función normal [3], [4]. Esta estrategia tiene el potencial de mejorar significativamente la permeabilidad arterial a largo plazo.

Sin embargo, fabricar estos dispositivos biodegradables, especialmente a la escala y precisión necesarias para implantarlos en vasos sanguíneos como las arterias coronarias, representa un gran desafío tecnológico [4], [5].

Aquí es donde entra en juego la impresión 3D o Manufactura Aditiva, una tecnología que construye objetos capa por capa a partir de un diseño digital. Este método ha surgido como una alternativa prometedora y económica para producir dispositivos médicos poliméricos, incluidos los stents [1], [2], [4].

En este artículo de divulgación exploraremos cómo la impresión 3D no solo hace posible fabricar stents que se disuelven, sino también adaptarlos a las necesidades específicas de cada paciente. Además, se describen los materiales utilizados, la forma en que los científicos logran la precisión necesaria y las implicaciones de esta tecnología en áreas médicas como la cardiología y la cirugía pancreática [1], [2], [4], [6].

La solución biodegradable: materiales y desafíos

Para fabricar stents bioabsorbibles se utilizan polímeros biodegradables, es decir, materiales plásticos médicos que el cuerpo puede descomponer en sustancias inofensivas, como agua y dióxido de carbono, mediante un proceso químico llamado hidrólisis [3], [4].

Dos materiales destacan en la investigación de estos dispositivos: la policaprolactona (PCL) y el ácido poliláctico (PLA) [1], [2], [4].

La policaprolactona (PCL) es un poliéster biodegradable con un punto de fusión bajo, cercano a los 60 °C. Ha recibido gran atención como biomaterial implantable debido a su alta flexibilidad y su largo tiempo de degradación, que puede superar los 24 meses [1], [3].

El ácido poliláctico (PLA) es un poliéster termoplástico biodegradable derivado de recursos renovables, como el almidón de maíz. Tiene un punto de fusión más alto, entre 173 °C y 178 °C, y un tiempo de degradación menor que el PCL. Además, suele ser más rígido [2]–[4].

El principal desafío de usar polímeros es que poseen menor resistencia mecánica que los metales. Un stent debe ser suficientemente flexible para desplazarse a través de vasos sanguíneos complejos, pero también debe mantener la rigidez necesaria para sostener el vaso enfermo sin colapsar. Encontrar ese equilibrio es esencial para el éxito clínico [3]–[5].

La impresión 3D: la herramienta precisa

Tradicionalmente, los stents metálicos se fabrican mediante microcorte láser. Aunque este proceso es efectivo, el calor generado puede provocar daños en el material, como zonas afectadas térmicamente, microfisuras y residuos que requieren costosos procesos posteriores de limpieza y reparación [4], [5].

La Manufactura Aditiva ofrece una alternativa más rápida, limpia y económica. La técnica más utilizada en la investigación de stents poliméricos es la Fabricación por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés: *Fused Deposition Modeling*). En este método, un filamento plástico se funde y se deposita capa por capa mediante una boquilla muy fina hasta construir la estructura final [1], [4].

En el caso de los stents, los investigadores desarrollaron una impresora 3D tubular basada en tecnología FDM. A diferencia de las impresoras convencionales, esta máquina utiliza una plataforma rotatoria controlada por computadora [1]. Este detalle es importante porque los stents son estructuras cilíndricas y, si se imprimieran sobre una base plana, requerirían soportes internos difíciles de retirar y capaces de dañar la pieza final. Gracias a la plataforma rotatoria, el stent puede construirse directamente sobre una superficie cilíndrica, simplificando el proceso y mejorando la eficiencia de fabricación [1], [4].

En la Figura 1 se muestra un esquema simplificado de esta impresora tubular, donde el filamento de PCL o PLA se funde y deposita sobre una plataforma rotatoria para formar el stent.

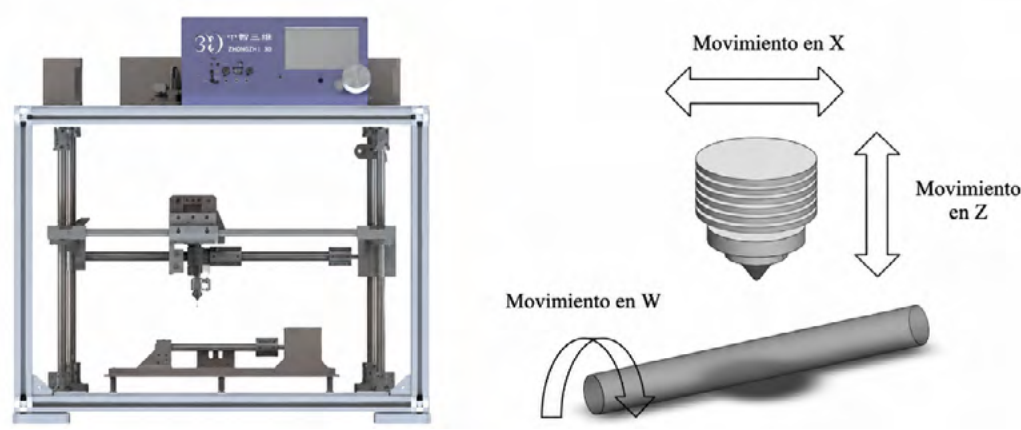


Figura 1. Proceso de Manufactura Aditiva tubular para stents bioabsorbibles [1].

Ajustando la precisión: el efecto de los parámetros de impresión

Para que un stent funcione correctamente debe tener una precisión dimensional extremadamente alta, del orden de micrómetros [1].

Los investigadores analizaron cómo distintos parámetros de impresión afectan las características físicas del stent de PCL, como su precisión dimensional, la distribución del material y su comportamiento radial [1].

Los principales parámetros estudiados fueron [1]:

Temperatura de la boquilla: influye en la viscosidad del polímero.

Tasa de flujo: determina la cantidad de material extruido.

Velocidad de impresión: define la rapidez con que se mueve la boquilla.

Los resultados mostraron que la precisión dimensional depende principalmente de la temperatura y de la tasa de flujo, mientras que la velocidad de impresión tuvo poca influencia [1].

Por ejemplo, una temperatura más alta reduce la viscosidad del PCL, permitiendo que el material fluya con mayor facilidad sobre la superficie cilíndrica. Esto puede disminuir el grosor del stent, pero aumentar el ancho de sus estructuras de soporte [1].

Controlar el grosor del stent es especialmente importante porque estudios clínicos han demostrado que los puntales más delgados reducen el riesgo de reestenosis, es decir, la nueva obstrucción del vaso sanguíneo [4], [5]. La impresión 3D facilita este control gracias al ajuste preciso de la distancia entre la boquilla y la superficie de impresión, así como del número de capas [1].

Los experimentos demostraron que este proceso puede alcanzar una precisión dimensional promedio de entre 80 % y 90 % respecto al diseño original, lo cual confirma el potencial de la impresión 3D para fabricar stents funcionales [1], [4].

La estructura del material y el comportamiento radial

Además de la forma del stent, también es importante conservar adecuadamente la estructura interna del material, conocida como cristalinidad. Una mayor cristalinidad incrementa la rigidez y la resistencia mecánica, aunque también modifica la velocidad de degradación del polímero [3], [5].

Los estudios encontraron que el proceso de impresión 3D altera muy poco la estructura del PCL, lo que representa una ventaja importante frente al corte láser, ya que evita tratamientos posteriores costosos para restaurar las propiedades del material [1], [4].

En cuanto al comportamiento radial, los stents de PCL mostraron gran flexibilidad, con una expansión promedio cercana al 320 % y un retroceso elástico (recoil) de aproximadamente 22 % [1]. Esta flexibilidad permitió evitar rupturas durante la expansión del dispositivo.

La capacidad de expansión radial es fundamental para mantener abierto el vaso sanguíneo después de la angioplastia [4], [5]. En la Figura 2 se presenta un gráfico que ilustra la elevada expansión y el bajo retroceso elástico de los stents de PCL.

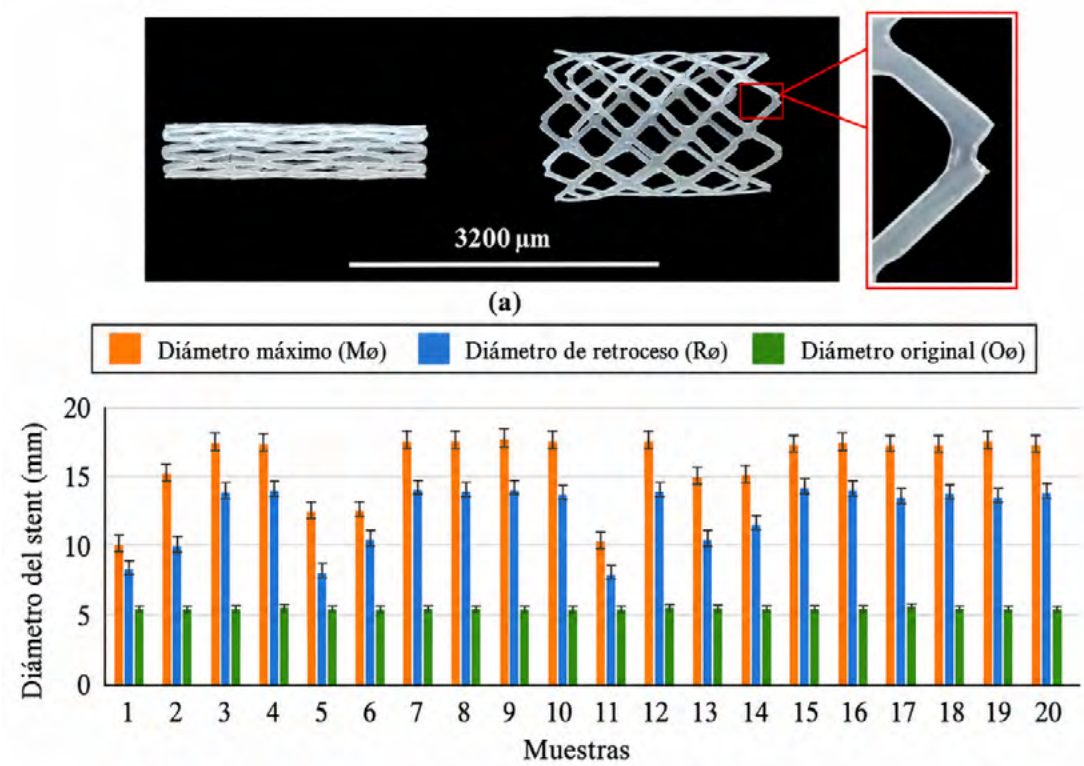


Figura 2. Comportamiento radial típico de un stent de PCL impreso en 3D [1].

La ingeniería de stents compuestos (PCL/PLA)

Aunque el PCL ofrece gran flexibilidad, también presenta un inconveniente: su retroceso radial después de la expansión es relativamente alto [1]. En contraste, el PLA tiene un retroceso mucho menor gracias a su mayor rigidez, pero su capacidad de expansión es limitada [2].

Para combinar las ventajas de ambos materiales, los investigadores desarrollaron stents compuestos de PCL/PLA utilizando la misma tecnología de impresión 3D tubular [2]. Esta técnica permite fabricar estructuras multicapa, algo muy difícil de lograr con métodos tradicionales como el corte láser [1], [2].

Los stents compuestos mostraron propiedades prometedoras [2]:

Mantuvieron la elasticidad del PCL, favoreciendo una buena expansión radial.

Aprovecharon la rigidez del PLA, reduciendo el retroceso excesivo.

Además, las pruebas biológicas realizadas con células fibroblásticas 3T3 demostraron que ambos materiales son biocompatibles. El PCL mostró una proliferación celular superior, lo cual podría favorecer la cicatrización vascular [2].

En aplicaciones cardiovasculares, se propone utilizar PCL en la capa exterior para estimular la regeneración celular de la pared del vaso y PLA en la capa interior para disminuir la proliferación excesiva asociada con la reestenosis [2].

En la Figura 3 se muestra un esquema comparativo del comportamiento mecánico de los stents de PCL, PLA y del compuesto PCL/PLA.

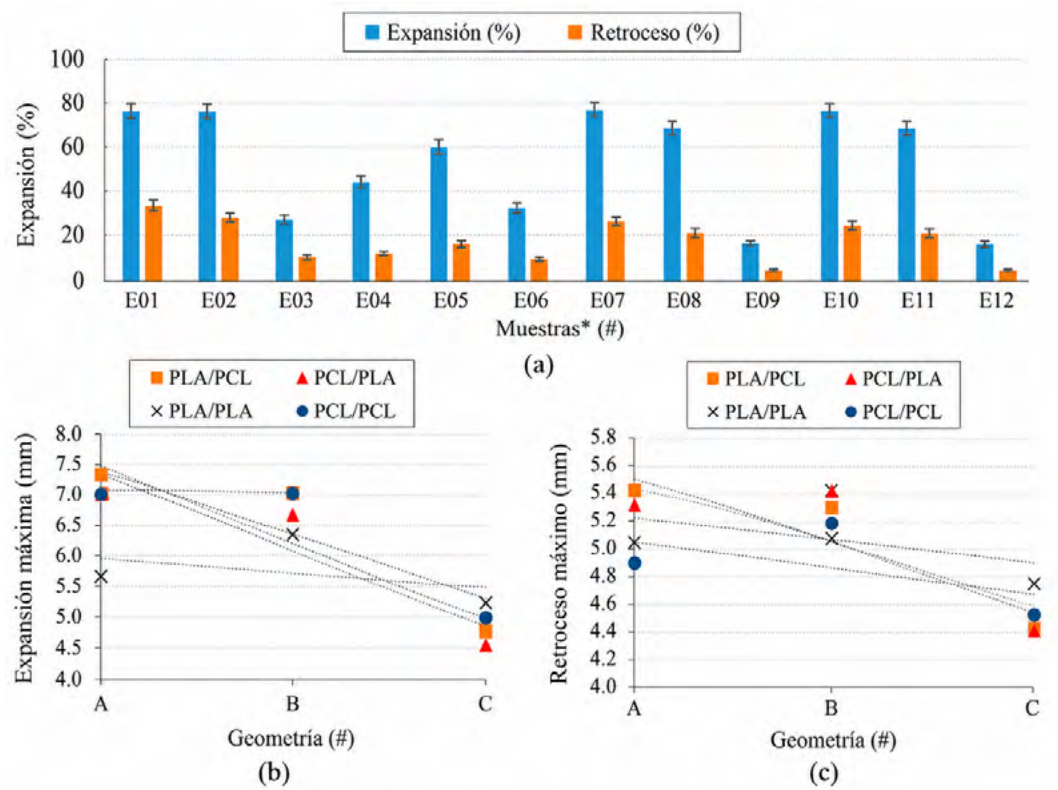


Figura 3. Stent compuesto PCL/PLA y ventajas mecánicas [2].

Stents para cirugía pancreática: un caso de estudio en personalización

La aplicación de stents biodegradables impresos en 3D no se limita a las arterias coronarias. También ofrece soluciones prometedoras en cirugías complejas, como la pancreatoduodenectomía, un procedimiento frecuente en pacientes con tumores en la cabeza del páncreas [6].

Una de las principales complicaciones posteriores a esta cirugía es la fistula pancreática postoperatoria (POPF, por sus siglas en inglés: Postoperative Pancreatic Fistula), que ocurre cuando el jugo pancreático se filtra hacia el abdomen [6].

Los stents de silicona tradicionales presentan dos problemas principales [6]:

Si el tamaño del stent es menor que el conducto pancreático, queda un espacio que favorece las filtraciones.

Si el ajuste es demasiado preciso, la sutura quirúrgica se vuelve más complicada.

Además, estos dispositivos pueden desplazarse y causar complicaciones como pancreatitis, formación de cálculos o perforaciones intestinales [6].

Para resolver estos problemas, investigadores desarrollaron un stent biodegradable de PLA impreso en 3D y diseñado específicamente para cada paciente [6].

Mediante tomografías computarizadas (CT, por sus siglas en inglés: *Computed Tomography*), se generan reconstrucciones tridimensionales precisas del páncreas y del conducto pancreático. Esto permite fabricar stents personalizados que coinciden exactamente con las dimensiones anatómicas requeridas [6].

El diseño incorpora orificios laterales para facilitar el drenaje de fluidos y un disco en el extremo intestinal para mejorar el acoplamiento y simplificar la sutura [6].

Resultados prometedores en cirugía pancreática

Los experimentos realizados en mini cerdos tibetanos compararon los stents impresos en 3D con los stents tradicionales de silicona [6].

Los resultados mostraron una reducción significativa en el tiempo quirúrgico y en la duración de la anastomosis pancreaticoyeyunal, es decir, la unión quirúrgica entre el páncreas y el intestino [6].

En términos de seguridad, no se observaron diferencias importantes en complicaciones postoperatorias, como pancreatitis o fistulas pancreáticas, respecto al grupo tratado con stents convencionales [6].

Además, el análisis inmunohistoquímico confirmó que el dispositivo no incrementó la inflamación local, lo que respalda su biocompatibilidad [6].

La impresión 3D también demostró una gran precisión anatómica, con discrepancias máximas de solo 0.2 mm entre las mediciones obtenidas mediante tomografía y las observadas durante la cirugía [6].

Impacto y reflexión social

La impresión 3D de stents bioabsorbibles representa un avance importante hacia la medicina personalizada y los tratamientos mínimamente invasivos [2], [4], [6].

Entre sus principales beneficios destacan:

La reducción de complicaciones tardías, como trombosis y reestenosis, al evitar la permanencia del metal [3], [4].

La disminución de costos de fabricación, gracias a un proceso más limpio y eficiente [1], [4].

La posibilidad de crear dispositivos adaptados a la anatomía específica de cada paciente [2], [6].

La investigación también ha demostrado que combinar materiales como PCL y PLA permite superar las limitaciones mecánicas de cada polímero por separado [2], [5]. Esta estrategia produce stents con propiedades más adecuadas para aplicaciones biomédicas exigentes.

Conclusión

El desarrollo de stents bioabsorbibles impresos en 3D a partir de polímeros como PCL y PLA representa una de las líneas de investigación más prometedoras en la medicina moderna. Los estudios revisados demuestran que esta tecnología puede fabricar dispositivos con alta precisión dimensional y propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones clínicas.

Además, el control preciso de parámetros como la temperatura y la tasa de flujo permite optimizar la calidad del stent y adaptar sus características a distintas necesidades médicas.

Más allá de la cardiología, la impresión 3D también ofrece soluciones innovadoras para cirugías complejas, como las pancreáticas, mediante dispositivos personalizados que simplifican los procedimientos y reducen complicaciones postoperatorias.

Aunque la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés: *Food and Drug Administration*) todavía limita el uso clínico de algunos stents impresos en 3D y se requieren más estudios clínicos, la evidencia científica sugiere que esta tecnología podría transformar el futuro de los dispositivos médicos implantables.

El stent bioabsorbible no solo representa una mejora frente al stent metálico tradicional; también simboliza un futuro en el que los tratamientos médicos desaparecen una vez cumplida su función, dejando al paciente sano y sin rastros permanentes de intervención.

Referencias bibliográficas

- [1] A. J. Guerra and J. Ciurana, “3D-Printed Bioabsorbable Polycaprolactone Stent: The Effect of Process Parameters on Its Physical Features,” *Materials & Design*, vol. 141, pp. 20–29, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.045>.
- [2] A. J. Guerra, P. Cano, M. Rabionet, T. Puig, and J. Ciurana, “3D-Printed PCL/PLA Composite Stents: Towards a New Solution to Cardiovascular Problems,” *Materials*, vol. 11, no. 9, p. 1679, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11091679>.
- [3] Q. Luo *et al.*, “Degradation Model of Bioabsorbable Cardiovascular Stents,” *PLoS ONE*, vol. 9, no. 11, e110278, 2014, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110278>.
- [4] W. Hua *et al.*, “3D Printing of Biodegradable Polymer Vascular Stents: A Review,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, vol. 1, p. 100020, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100020>.
- [5] Y. Wei, M. Wang, D. Zhao, H. Li, and Y. Jin, “Structural Design of Mechanical Property for Biodegradable Polymeric Stent,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 2960435, 14 pp., 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/2960435>.
- [6] F. Xiang, C. Yao, G. Guan, and F. Luo, “Application of 3D Printing to Design and Manufacture Pancreatic Duct Stent and Animal Experiments,” *Bioengineering*, vol. 11, no. 10, p. 1004, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11101004>.



CIENCIAS DE LA SALUD

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026

<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.sal.02>
e0402SAL02

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UAQ
ISSN: 2603-7944

La ergonomía del pedal

interruptor y el costo oculto de
la fatiga laboral

Ing. Jessica Guerrero Macías¹



¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0009-0005-4830-8076>. jessica.
gmacias@gmail.com

RESUMEN

Aunque suele pasar desapercibido, el pedal interruptor desempeña un papel importante en la salud y el desempeño de las personas que trabajan durante largos periodos de pie, como personal médico, técnico e industrial. Un diseño inadecuado, una ubicación incorrecta o la necesidad de aplicar demasiada fuerza pueden provocar fatiga, molestias musculares y aumentar el riesgo de errores durante las tareas. Este artículo explica cómo principios de ergonomía, la disciplina que adapta herramientas y espacios a las capacidades humanas, pueden aplicarse al diseño de estos dispositivos para mejorar la comodidad y la seguridad. También se describe el uso de la electromiografía de superficie, una técnica que mide la actividad eléctrica de los músculos mediante sensores colocados sobre la piel, para evaluar objetivamente el esfuerzo físico asociado al uso de distintos pedales. Comprender la relación entre diseño, fatiga y rendimiento permite identificar oportunidades para crear entornos de trabajo más seguros, eficientes y saludables, con beneficios tanto para las personas trabajadoras como para las organizaciones.

Introducción

¿Sabías que los trastornos musculoesqueléticos (TME, lesiones o molestias que afectan músculos, articulaciones, tendones y ligamentos) se relacionan con el tiempo prolongado en posturas estáticas, en especial cuando la persona trabaja de pie durante gran parte de su jornada sin oportunidad de cambiar su posición? La fatiga que aparece tras horas de trabajo de pie, frente a una máquina o en un quirófano, no es una simple molestia normal de la jornada laboral. Esto es, en gran medida, el resultado de decisiones de diseño: desde cómo se organiza el puesto de trabajo, dónde se colocan los controles, qué ángulo adopta el cuerpo para realizar la operación y, en particular, cómo se configuran dispositivos tan discretos (y decisivos) como el pedal interruptor. La evidencia en ergonomía muestra que las posturas estáticas, el trabajo prolongado de pie, el uso repetido de controles mal ubicados y la ausencia de ajustes basados en la antropometría (disciplina que estudia las dimensiones y proporciones del cuerpo humano) incrementan el riesgo de dolor lumbar, sobrecarga en cuello y extremidades inferiores, y TME que se acumulan a largo plazo [1]–[4].

En hospitales, laboratorios y líneas de producción, el pedal interruptor se ha establecido como una solución eficiente para operar dispositivos con el pie y mantener las manos libres para tareas de precisión, manipulación o procesos repetitivos. No obstante, cuando su diseño no toma en cuenta los principios ergonómicos básicos, este mismo dispositivo puede contribuir a la fatiga, los errores y el deterioro silencioso del bienestar del personal.

El costo oculto de la fatiga asociada al uso prolongado del pedal no solo se refleja en incomodidad, sino también en productividad reducida, ausentismo, presentismo (personas que asisten al trabajo, pero con un rendimiento reducido) y riesgo operativo.

El pedal interruptor como interfaz crítica de control

El pedal interruptor es un dispositivo de mando accionado con el pie que abre o cierra uno o varios contactos eléctricos para controlar equipos industriales o médicos, con configuraciones normalmente abiertas (NA) o normalmente cerradas (NC), definidas por normas como la IEC 60947-5-1 (norma internacional para dispositivos eléctricos de control) [5]. Esta lógica permite adaptar el pedal a funciones de encendido, activación momentánea, modo seguro o parada de emergencia, según el proceso y el nivel de riesgo implicado.

En la práctica, los pedales se utilizan en mesas quirúrgicas, sistemas de electrocirugía, equipos de imagen médica, máquinas de cosido industrial, prensas, sistemas de corte, equipos de envasado y estaciones automatizadas de producción [6]–[9]. Su ventaja central es clara, ya que permiten que las manos se concentren en la tarea principal mientras el pie realiza funciones críticas. Sin embargo, esta ventaja solo se materializa plenamente cuando el pedal está bien diseñado, correc-

tamente ubicado y adaptado al contexto de uso. Cuando no es así, se convierte en una fuente silenciosa de fatiga física y errores de activación; por ejemplo, cuando se debe “buscar” el pedal a ciegas, cuando exige demasiada fuerza, cuando obliga a extender o flexionar el tobillo de forma extrema o cuando requiere sostener una sola pierna activa durante horas [8], [9].

Fuerza, recorrido e inclinación: pequeños valores, grandes efectos

Los parámetros mecánicos del pedal —fuerza de accionamiento, recorrido y ángulo de inclinación— condicionan directamente la carga sobre el tobillo, el pie y la cadena musculoesquelética inferior. Estudios sobre pedales quirúrgicos y de control han demostrado que fuerzas de activación excesivas, recorridos largos o pendientes pronunciadas incrementan el esfuerzo, el tiempo de respuesta y la probabilidad de movimientos inestables [8], [9], [10]. Por el contrario, una fuerza moderada, un recorrido corto pero claramente perceptible y una inclinación suave permiten una activación segura sin exigir contracciones intensas y repetitivas.

La literatura recomienda trabajar con rangos que permitan mantener el tobillo próximo a una posición neutra, evitando flexiones dorsales o plantares extremas sostenidas, especialmente en tareas prolongadas [8], [9], [11]. Cuando el pedal se diseña sin estos criterios, la persona operadora compensa con posturas asimétricas, apoyo excesivo en una pierna, tensión en la pantorrilla y ajustes constantes del centro de gravedad que, a lo largo del turno, se traducen en mayor fatiga.

Antropometría y postura: alinear el pedal con el cuerpo real

La ergonomía aplicada recuerda una regla básica: los controles deben diseñarse a partir de las dimensiones reales y de la variabilidad de las personas usuarias, no al revés. Referencias como *Bodyspace* de Stephen Pheasant y los manuales clásicos de factores humanos insisten en que la ubicación de controles de pie debe considerar la longitud del pie, la amplitud de paso, la postura neutra, el calzado y el espacio disponible para movimientos seguros [13]–[15].

Como se detalla en el ejemplo de la Figura 1, en términos prácticos, esto implica colocar el pedal dentro del rango cómodo de alcance del pie, evitando que la persona usuaria deba inclinar el tronco o rotar la cadera de forma constante. También es importante ajustar la altura y la inclinación del pedal para que el pie pueda descansar sobre su superficie sin forzar el tobillo y con apoyo estable y antideslizante. La superficie debe tener dimensiones suficientes para identificarla fácilmente con el calzado y evitar activaciones involuntarias. Asimismo, es necesario considerar las variaciones de estatura, talla de calzado y tipo de tarea, especialmente en entornos con múltiples usuarios.



Figura 1. Principios ergonómicos para la ubicación y el diseño de un pedal médico de control.

Estudios específicos sobre pedales médicos y de interacción con el pie muestran que las variaciones en la pendiente, en la dirección del movimiento y en el punto de contacto modifican significativamente la precisión y el confort, reforzando la importancia de diseñar con criterios medibles y no mediante ensayo informal [8], [9], [11].

sEMG como herramienta objetiva para evaluar la demanda muscular

Para pasar del “se siente pesado” a la evidencia cuantificable, la electromiografía de superficie (sEMG, técnica que registra la actividad eléctrica de los músculos mediante sensores colocados sobre la piel) se ha convertido en una herramienta clave en ergonomía y biomecánica (Figura 2). Mediante electrodos colocados sobre la piel, la sEMG registra la actividad eléctrica de los músculos durante el uso de un dispositivo, permitiendo analizar qué grupos musculares trabajan más, con qué intensidad y durante cuánto tiempo [19]–[21].

Aplicada al estudio de pedales interruptores, la sEMG permite comparar diferentes diseños en términos de fuerza, inclinación y posición para determinar cuál genera una menor activación muscular sostenida. También ayuda a identificar sobrecargas en músculos de la pierna o la región lumbar asociadas con posiciones forzadas y a validar ajustes realizados en el entorno de trabajo, como la reubicación del pedal, modificaciones en la inclinación o la incorporación de plataformas, mediante datos objetivos.

Recomendaciones como las del grupo SENIAM (Surface Electromyography for the Non-Invasive Assessment of Muscles, proyecto internacional que desarrolló estándares para el uso de electromiografía de superficie) han estandarizado procedimientos de colocación de electrodos y análisis de señal, lo que aporta confiabilidad a los estudios que relacionan el diseño de controles accionados con el pie y la demanda muscular [22]. De esta manera, el rediseño del pedal deja de basarse únicamente en la percepción subjetiva y se apoya en mediciones reproducibles.



Figura 2. Evaluación de la demanda muscular mediante electromiografía de superficie durante el uso de un pedal médico.

Normas y lineamientos: del criterio técnico a la obligación ética

Las normas no sustituyen al diseño, pero establecen el nivel mínimo aceptable de seguridad y funcionalidad. La ISO 6385 establece principios generales para el diseño de sistemas de trabajo centrados en la persona, insistiendo en adaptar tareas y medios a las capacidades físicas y cognitivas de quienes trabajan [11]. Por su parte, la NOM-036-1-STPS-2018 en México reconoce formalmente los factores de riesgo ergonómico asociados a los TME, recordando que el daño musculoesquelético es prevenible cuando se controla la carga física y se diseñan puestos de trabajo seguros [12].

En conjunto con normas específicas para equipos eléctricos y sistemas de control, estos documentos refuerzan la obligación técnica y legal de no tratar la fatiga como un simple “costo colateral”, sino como un indicador de diseño deficiente. Considerar la ergonomía del pedal interruptor es coherente con este marco, ya que forma parte de la responsabilidad de asegurar que la interfaz de control no exponga a las personas a riesgos innecesarios.

El costo oculto de la fatiga: más allá del cansancio al final del turno

Los TME relacionados con malas posturas, trabajo prolongado de pie y uso de controles mal diseñados tienen efectos directos sobre la vida diaria: dolor persistente, dificultad para caminar o subir escaleras, alteraciones del sueño, necesidad de medicación y limitaciones en actividades fuera del trabajo. Este deterioro funcional no solo afecta a la persona, sino que también reduce la disponibilidad física y mental para enfrentar nuevas demandas laborales.

Diversos estudios han documentado la relación entre los TME y la productividad, observando mayores niveles de ausentismo, presentismo, errores, tiempos más prolongados de ejecución

y una disminución de la calidad en procesos críticos, como la atención médica o la operación de maquinaria industrial [23]–[26]. El llamado “costo oculto” incluye la sustitución de personal, la rotación laboral y la capacitación de nuevos operarios. También contempla la disminución de la precisión en tareas donde el pedal controla funciones críticas, como el corte, el sellado, la activación de energía o el manejo de dispositivos médicos. Además, existen riesgos asociados a incidentes o casi accidentes derivados de activaciones tardías, imprecisas o involuntarias.

Desde esta perspectiva, invertir en el diseño y la evaluación ergonómica de un pedal interruptor deja de ser un detalle técnico accesorio para convertirse en una estrategia de gestión de riesgos y sostenibilidad organizacional.

Aplicación de principios ergonómicos al diseño del pedal interruptor

Integrar los hallazgos de la ergonomía clásica, la antropometría, la sEMG y las normas vigentes permite establecer criterios claros para el diseño y la selección de pedales interruptores.

La función de control debe ser segura y clara, utilizando configuraciones NA o NC adecuadas, así como fuerzas y recorridos suficientes para evitar activaciones accidentales sin comprometer la comodidad de la persona usuaria [5]. Asimismo, el pedal debe colocarse de manera que permita mantener el tobillo en una posición natural, evitando rotaciones forzadas del tronco o apoyos unilaterales prolongados [8], [9], [11].

Los parámetros de diseño deben ser medibles y verificables. Esto implica definir con precisión la fuerza requerida para el accionamiento, el ángulo de trabajo y la inclinación, así como evaluar experimentalmente estos factores mediante sEMG y observaciones de campo que permitan confirmar una reducción de la carga muscular [19]–[22].

También es necesario considerar la diversidad antropométrica de la población usuaria, el tipo de calzado, el contexto de uso —como quirófanos, laboratorios o líneas de producción— y la duración real de las tareas [13]–[15]. Finalmente, el desempeño del pedal debe revisarse de manera continua ante cambios en los procesos, incrementos en los tiempos de uso o reportes de molestias, siguiendo principios de mejora continua y prevención de TME [11], [12].

Conclusión

Un pedal interruptor diseñado con criterios ergonómicos no solo resulta más cómodo para quien lo utiliza; también contribuye a proteger la salud musculoesquelética, mejorar la precisión de la operación y reducir, de manera casi imperceptible, los periodos de baja productividad, atención y calidad. En trabajos de larga duración, donde cada decisión de diseño se acumula en el cuerpo de las personas, ignorar este dispositivo significa desaprovechar una oportunidad importante para disminuir el costo oculto de la fatiga laboral.

Referencias

- [1] K. H. E. Kroemer and E. Grandjean, *Fitting the Task to the Human: A Textbook of Occupational Ergonomics*, 5th ed. London, UK: CRC Press, 1997. doi: <https://doi.org/10.1201/9780367807337>
- [2] J. Dul and B. Weerdmeester, *Ergonomics for Beginners: A Quick Reference Guide*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420077520>
- [3] S. Pheasant and C. M. Haslegrave, *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315375212>

- [4] R. Bridger, *Introduction to Ergonomics*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008. doi: <https://doi.org/10.1201/9781439894927>
- [5] G. Salvendy, Ed., *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com>
- [6] H. Jo, O.-B. Lim, Y.-S. Ahn, S.-J. Chang and S.-B. Koh, “Negative impacts of prolonged standing at work on musculoskeletal symptoms and physical fatigue: The Fifth Korean Working Conditions Survey,” *Yonsei Medical Journal*, vol. 62, no. 6, pp. 510–518, 2021. doi: <https://doi.org/10.3349/ymj.2021.62.6.510>
- [7] B. Hatscher, M. Luz and C. Hansen, “Foot interaction concepts to support radiological interventions,” *i-com*, vol. 17, no. 1, pp. 3–13, 2018. doi: <https://doi.org/10.1515/icom-2018-0002>
- [8] N. Handigol and M. Ketkar, “Ergonomic Foot Switch Design for Electric Biomedical Devices (Bipolar Cautery, Medical Electric Drills and Saw),” *International Journal of Scientific Research*, vol. 12, no. 7, 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/372490301_Ergonomic_Foot_Switch_Design_for_Electric_Biomedical_Devices_Bipolar_Cautery_Medical_Electric_Drills_and_Saw
- [9] S.-W. Kim and S.-K. Hong, “Effects of footpad slope, movement direction and contact part of foot on foot-based interactions,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, Art. no. 6636, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/app13116636>
- [10] M. A. van Veelen, C. J. Snijders, E. van Leeuwen, R. H. M. Goossens and G. Kazemier, “Improvement of foot pedals used during surgery based on new ergonomic guidelines,” *Surgical Endoscopy*, vol. 17, no. 7, pp. 1086–1091, 2003. doi: <https://doi.org/10.1007/s00464-002-9185-z>
- [11] *ISO 6385:2016 Ergonomic Principles in the Design of Work Systems*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2016. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/63785.html>
- [12] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, *NOM-036-I-STPS-2018. Factores de riesgo ergonómico en el trabajo. Parte 1: Manejo manual de cargas*. México, 2018. Disponible en: <https://www.dof.gob.mx>
- [13] F. Nachreiner, “Standards for ergonomics principles relating to the design of work systems and to mental workload,” *Applied Ergonomics*, vol. 26, no. 4, pp. 259–263, 1995. doi: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00029-C](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00029-C)
- [14] H. J. Hermens, B. Freriks, C. Disselhorst-Klug and G. Rau, “Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 10, no. 5, pp. 361–374, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00027-4)
- [15] European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), *Work-related Musculoskeletal Disorders: Prevalence, Costs and Demographics in the EU*, 2019. Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/publications/msds-facts-and-figures-overview-prevalence-costs-and-demographics-msds-europe>
- [16] World Health Organization (WHO), *Musculoskeletal Health*. Fact Sheet, 2022. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>
- [17] R. Escorpizo, “Understanding work productivity and its application to work-related musculoskeletal disorders,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, nos. 3–4, pp. 291–297, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.08.006>
- [18] M. E. Queiroz-Lima and F. Serranheira, “Absenteeism and presenteeism costs from occupational accidents with WRMSDs in a Portuguese hospital,” *DYNA*, vol. 83, no. 196, pp. 43–50, 2016. doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.56605>
- [19] M. Kang, “Relationship Between Musculoskeletal Disorders and Productivity Loss Among Hospital Nurses: An Analytical Cross-Sectional Study With Secondary Data Analysis,” *Journal of Nursing Scholarship*, 2025. doi: <https://doi.org/10.1111/jnu.70020>
- [20] C. Gregg *et al.*, “Work-Related Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review,” *Journal*

- of Clinical Medicine*, vol. 13, no. 13, Art. no. 3964, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/jcm13133964>
- [21] E. Barnard *et al.*, “Ergonomics and work-related musculoskeletal disorders in interventional physicians: a review,” *Current Problems in Diagnostic Radiology*, 2021. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8544652/>
- [22] B. Demissie *et al.*, “A systematic review of work-related musculoskeletal disorders and risk factors among computer users,” *Heliyon*, vol. 10, no. 3, Art. no. e25075, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25075>
- [23] European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), *OSH in Figures: Work-related Musculoskeletal Disorders in the EU — Facts and Figures*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. Disponible en: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5819be4f-0393-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en>
- [24] N. S. Abarqhouei and H. H. Nasab, “Total ergonomics and its impact in musculoskeletal disorders and quality of work life and productivity,” *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 79–88, 2011. doi: <https://doi.org/10.4236/ojsst.2011.13008>
- [25] H. Jo *et al.*, “Negative Impacts of Prolonged Standing at Work on Musculoskeletal Symptoms and Physical Fatigue: The Fifth Korean Working Conditions Survey,” versión de acceso abierto. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8149936/>
- [26] U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *Ergonomics*. Disponible en: <https://www.osha.gov/ergonomics>



CIENCIAS DE LA SALUD
Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026
<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.sal.03>
e0402SAL03

CIENCIA VITAL
Revista de Divulgación Científica de la UACJ
ISSN 2630-9194

Ratones como organismo modelo de la endometriosis

Dr. Alejandro Martínez^{*1}
Dra. Flor Daniela Alday-Montañez²
Dra. Elisa Robles-Escajeda³



^{*1} Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0000-0003-3448-910X>.
alejandro.martinez@uacj.mx

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0000-0002-9601-9026>

³ University of Texas at El Paso <https://orcid.org/0000-0002-0104-2857>



RESUMEN

La endometriosis es una enfermedad crónica que ocurre cuando tejido similar al revestimiento interno del útero crece fuera de este órgano, provocando síntomas como dolor menstrual intenso, dolor durante las relaciones sexuales, molestias al orinar o defecar y dolor persistente en la pelvis y la espalda. Se estima que afecta al menos a una de cada diez mujeres en edad reproductiva, impactando su bienestar físico, emocional, social y laboral. A pesar de su alta frecuencia y relevancia social, sus causas y mecanismos aún no se comprenden por completo, lo que dificulta el diagnóstico temprano y el desarrollo de tratamientos más efectivos. Para avanzar en su estudio, la investigación biomédica utiliza ratones y ratas, conocidos como modelos murinos, organismos que comparten importantes características biológicas con los humanos y permiten analizar la enfermedad en condiciones controladas. Aunque estos animales no menstrúan de forma natural, los científicos han desarrollado métodos para reproducir aspectos clave de la endometriosis. Gracias a estos modelos, ha sido posible comprender mejor la enfermedad y acelerar la búsqueda de nuevas estrategias para mejorar la salud y la calidad de vida de millones de mujeres.

Introducción

Todas y todos conocemos a alguna mujer, ya sea nuestra amiga, madre, hija, hermana o incluso nosotras mismas, que padece un dolor menstrual tan intenso que llega a ser incapacitante. La sociedad nos ha impulsado a considerar que esto es normal, como si fuera una consecuencia inherente a la naturaleza femenina. Esta creencia ha estigmatizado el dolor menstrual, reduciéndolo a una condena silenciosa en lugar de un problema que requiere atención. Sin embargo, es fundamental comprender que esto no tiene por qué ser así. El dolor menstrual incapacitante no es normal ni es algo con lo que se deba aprender a vivir: es un síntoma, una señal mediante la cual el cuerpo indica que algo no funciona correctamente. Una de las principales causas de este dolor es la endometriosis.

La endometriosis es una enfermedad ginecológica crónica caracterizada por el crecimiento de tejido similar al revestimiento del útero (endometrio) fuera de este órgano. Esta condición genera dolor pélvico que frecuentemente resulta incapacitante y puede causar infertilidad. Clínicamente, el cuadro de dolor se clasifica en lo que se conoce como las “5D”: dismenorrea (dolor menstrual intenso), dispareunia (dolor durante o después de las relaciones sexuales), disquecia (dolor al defecar), disuria (dolor o molestias al orinar) y dolor pélvico crónico.

La dismenorrea es el dolor pélvico intenso y los calambres durante la menstruación que suelen empeorar con el tiempo y que, con frecuencia, no se alivian con analgésicos comunes. La dispareunia es el dolor persistente y profundo en la pelvis durante o después de las relaciones sexuales. La disquecia se define como el dolor al defecar, generalmente durante el periodo menstrual, asociado con la afectación del intestino o del recto. La disuria corresponde al dolor o las molestias al orinar cuando el tejido endometrial se localiza cerca o sobre la vejiga. Finalmente, el dolor pélvico crónico puede presentarse en la parte baja del abdomen o en la espalda y ocurrir en cualquier momento del ciclo menstrual.

Esta enfermedad ha sido subestimada en diversos sectores sociales y de salud, a pesar de afectar significativamente la calidad de vida de las mujeres en edad reproductiva. Su impacto es profundo, pues afecta la economía debido al ausentismo laboral. La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce la endometriosis como una afección compleja y debilitante que requiere atención médica especializada. Aunque actualmente no existe una cura definitiva, un diagnóstico oportuno permite un manejo adecuado de los síntomas y mejora la calidad de vida de las pacientes [1].

A pesar de su alta prevalencia global, sigue siendo una condición cuyas causas son poco comprendidas e incluso poco conocidas en los ámbitos médicos y científicos. Los síntomas suelen normalizarse en el entorno familiar y social debido a los tabúes que atribuyen erróneamente al dolor menstrual incapacitante una característica inherente de la feminidad. En la práctica

clínica es común que el dolor se asocie a una baja tolerancia, lo que retrasa el diagnóstico y deja desatendida la enfermedad. Simultáneamente, en el ámbito laboral persiste la estigmatización hacia las mujeres debido al ausentismo derivado de esta patología [2].

Este tejido endometrial fuera de lugar puede adherirse a los ovarios, las trompas de Falopio, el intestino, la cavidad abdominal y otros órganos abdominales; en casos excepcionales puede localizarse en otras partes del cuerpo, incluido el cerebro. Es importante reiterar que la endometriosis, con su dolor característico y su asociación con la infertilidad, afecta profundamente la salud física y emocional de las pacientes, así como su entorno familiar y social [1].

Uno de los mayores desafíos científicos radica en comprender el origen de la enfermedad y la gran diversidad de sus manifestaciones clínicas. Por ejemplo, algunas pacientes presentan dolor intenso con lesiones mínimas, mientras que otras presentan lesiones extensas con síntomas leves. A esto se suma que el principal método de diagnóstico y tratamiento es la laparoscopia, una cirugía mínimamente invasiva que permite observar el interior del abdomen mediante una cámara especializada. Este procedimiento es costoso y poco accesible, ya que requiere personal altamente capacitado, equipo especializado e instalaciones quirúrgicas adecuadas.

Además, el estudio directo de estos procesos en humanos se ve limitado por restricciones prácticas y éticas, como el difícil acceso a los tejidos afectados y la imposibilidad de probar tratamientos experimentales en etapas tempranas. Ante estas barreras, la investigación científica recurre habitualmente a organismos modelo, destacando el ratón como uno de los mamíferos más utilizados.

El presente artículo expone la relevancia de los ratones como modelos experimentales para el estudio de la endometriosis humana. Se revisan los avances obtenidos mediante su uso, sus principales limitaciones y sus aportaciones al desarrollo de mejores estrategias diagnósticas y terapéuticas, con el fin de contribuir también al aumento de la conciencia social sobre la salud femenina.

Los ratones como aliados en el estudio de la endometriosis

Un organismo modelo es una especie biológica que la ciencia utiliza para estudiar procesos compartidos con otros seres vivos, incluidos los humanos. Estos organismos son elegidos por su facilidad de manejo, bajo costo y alta tasa de reproducción. Debido a que muchos mecanismos biológicos se han conservado durante la evolución, los hallazgos obtenidos en organismos modelo pueden aportar información útil para comprender procesos relacionados con la salud y la enfermedad humanas.

Su uso, bajo estrictas normas bioéticas, permite analizar procesos complejos de forma ética y controlada, facilitando avances importantes como el desarrollo de antibióticos, vacunas y terapias contra el cáncer y, en este caso, contra la endometriosis.

¿Por qué los ratones se utilizan tanto en la investigación biomédica?

El uso de ratones (*Mus musculus*) en estudios biomédicos es muy común porque comparten cerca del 95 % de sus genes con los humanos, lo que permite extrapolar muchos descubrimientos biológicos a nuestra especie. Además, su ciclo de vida breve y su alta capacidad reproductiva facilitan el estudio de varias generaciones en poco tiempo, ayudando a identificar factores genéticos y ambientales relacionados con las enfermedades.

Otra gran ventaja es que los ratones pueden modificarse genéticamente. Existen modelos en los que es posible activar o desactivar genes específicos para estudiar su función. Esto resulta clave en enfermedades complejas como la endometriosis, que involucran factores hormonales, inmunológicos y genéticos (Figura 1) [3].

Sin embargo, en el caso de la endometriosis, el principal reto biomédico radica en que los ratones no menstrúan. A diferencia de las mujeres, su ciclo reproductivo no incluye sangrado ni desprendimiento de tejido uterino, por lo que no desarrollan endometriosis de forma natural. Esto ha motivado la creación de modelos experimentales donde, mediante diversas intervenciones, se inducen lesiones similares a las observadas en la enfermedad humana.

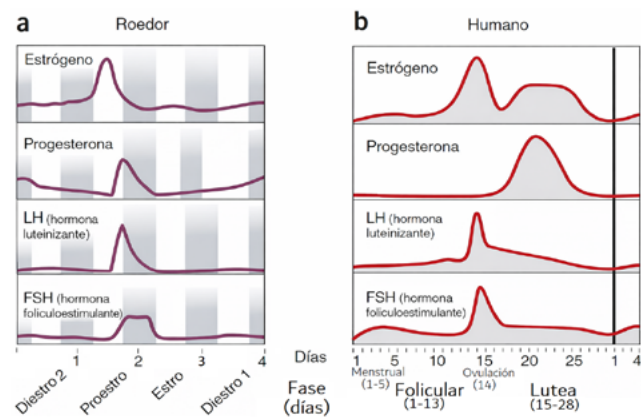


Figura 1. Los ciclos hormonales de la reproducción son similares entre las ratonas y las humanas. a) Las ratonas no presentan menstruación natural, ya que durante su ciclo estral el tejido endometrial se reabsorbe en lugar de desprenderse si no hay embarazo. b) En las mujeres, el tejido se desprende durante la menstruación cuando no ocurre la fecundación. En ambos casos, los perfiles hormonales responden de manera similar. Imagen modificada de Staley y Scharfman [4].

Endometriosis en ratones

Debido a la ausencia de menstruación en los roedores, se han desarrollado diversos modelos experimentales en ratones y ratas (conocidos en conjunto como modelos murinos) para estudiar la endometriosis (Figura 2).

Modelos experimentales de endometriosis en ratones

Estrategias utilizadas para estudiar la endometriosis a pesar de la ausencia de menstruación en los roedores.

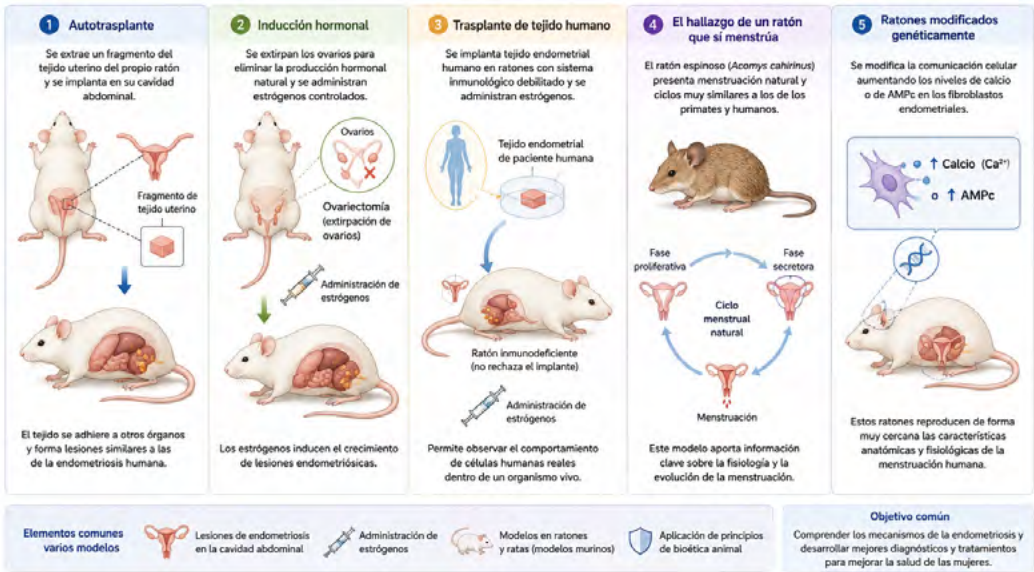


Figura 2. Principales modelos experimentales utilizados para estudiar la endometriosis en ratones.

- 1) Autotrasplante. En este método, se extrae un pequeño fragmento del tejido uterino del propio animal y se reubica quirúrgicamente en su cavidad abdominal. Este tejido logra adherirse a otros órganos, formando lesiones muy similares a las que presentan las mujeres con endometriosis [5].
- 2) Inducción hormonal. Dado que la endometriosis es una enfermedad fuertemente influida por las hormonas, este modelo permite un control riguroso del entorno biológico. Se mantiene el útero en su lugar, pero se extirpan los ovarios de las ratonas para detener su producción hormonal natural y, posteriormente, se administran dosis controladas de estrógenos para simular la enfermedad [6].
- 3) Trasplante de tejido humano. Consiste en implantar tejido endometrial proveniente de pacientes humanas en ratones. Para que el organismo del animal no rechace el implante, se utilizan ratones con un sistema inmunológico debilitado. Aunque requiere cuidados éticos y técnicos muy estrictos, este modelo permite observar el comportamiento de células humanas reales dentro de un organismo vivo. Al igual que en el modelo anterior, se administran estrógenos para favorecer el crecimiento de las lesiones [7].
- 4) El hallazgo de un ratón que sí menstrúa. Recientemente se descubrió una especie particular conocida como ratón espinoso, que presenta menstruación de manera natural y ciclos sorprendentemente parecidos a los de los primates y los humanos [8]. Este hallazgo no solo aporta conocimiento sobre la fisiología y la fisiopatología de la menstruación, sino que también abre nuevas oportunidades para comprender la evolución de la reproducción humana.
- 5) Ratones modificados genéticamente. Gracias a la ingeniería genética, recientemente se desarrolló una cepa de ratones que reproduce de forma muy cercana las características anatómicas y fisiológicas de la menstruación humana. Para lograrlo, los científicos modificaron la comunicación celular elevando los niveles de calcio o de moléculas mensajeras como el AMPc (adenosín monofosfato cíclico, una molécula que participa en la comunicación celular) en los fibroblastos endometriales, células que brindan soporte estructural al útero [9]. Este modelo representa una herramienta prometedora para el estudio de la fisiología menstrual y el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas para la endometriosis.

Aportes clave de los modelos murinos al estudio de la endometriosis

Los modelos experimentales en ratones y ratas han permitido comprender que la endometriosis no se limita a la región pélvica, sino que constituye un trastorno inflamatorio sistémico.

Diversos estudios han demostrado que ciertas células del sistema inmunológico, cuya función habitual consiste en eliminar tejidos anormales, pueden contribuir paradójicamente a la supervivencia y al crecimiento del tejido endometriósico. Esta situación favorece un estado persistente de inflamación crónica [10].

Asimismo, se ha confirmado el papel central de los estrógenos como promotores del desarrollo y progresión de la enfermedad. También se identificó un fenómeno conocido como resistencia a la progesterona. En condiciones normales, esta hormona ejerce un efecto regulador y protector; sin embargo, en la endometriosis, el tejido pierde la capacidad de responder adecuadamente a esta señal hormonal, permitiendo que las lesiones continúen creciendo [11].

Por otra parte, la investigación en modelos murinos ha demostrado que el tejido endometriósico puede atraer fibras nerviosas y establecer conexiones directas con el sistema nervioso. Este hallazgo ayuda a explicar por qué algunas pacientes experimentan dolor intenso incluso cuando las lesiones son relativamente pequeñas.

Impacto médico y social de la investigación con ratones

Aunque los roedores no desarrollan endometriosis de manera natural, su utilización como modelo experimental ha sido fundamental para mejorar los tratamientos hormonales actuales, evaluar nuevos fármacos y comprender la complejidad biológica de esta enfermedad.

Más allá del ámbito clínico, estos avances científicos han tenido un importante impacto social. Al aportar evidencia biológica sobre los mecanismos del dolor y la inflamación, la investigación ha contribuido a validar médicamente los síntomas reportados por las pacientes (Tabla 1).

Tabla 1. Algunos descubrimientos sobre la endometriosis apoyados por investigaciones en ratones.

Fenómeno	Hallazgo en investigaciones con ratones
Inflamación	Se ha demostrado la presencia de inflamación generalizada asociada con la enfermedad.
Hormonas	El crecimiento inicial puede ocurrir de forma independiente de los estrógenos y depender del sistema inmunológico; sin embargo, la progresión de la enfermedad requiere la participación del gen ESR1 (gen que codifica uno de los receptores celulares para el estrógeno) y niveles elevados de estrógenos. Además, los análogos de la GnRH (hormona liberadora de gonadotropina) reducen el crecimiento de las lesiones.
Dolor	Se ha observado hipersensibilidad mecánica en el abdomen y las extremidades posteriores, así como dolor visceral asociado con la presencia de tejido ectópico.
Medicamentos	Los tratamientos hormonales, como leuprolide y cetrorelix, disminuyen el crecimiento de las lesiones y reducen el dolor. También se han estudiado antiinflamatorios que actúan sobre la enzima COX-2 (enzima relacionada con los procesos inflamatorios) y neuromoduladores para controlar la inflamación y la sensibilización nerviosa. Actualmente se investigan nuevas terapias no hormonales que permitan tratamientos prolongados sin afectar la fertilidad.

Limitaciones y uso responsable del modelo murino

Es fundamental reconocer que los roedores no constituyen una réplica biológica exacta de los seres humanos. Existen diferencias importantes en su anatomía, en su sistema inmunológico y en su regulación hormonal. Por ello, los resultados obtenidos en el laboratorio deben interpretarse con cautela y validarse posteriormente mediante estudios clínicos en pacientes.

Lejos de disminuir el valor de estas herramientas experimentales, comprender sus limitaciones permite utilizarlas de forma ética y eficiente, integrándolas en una estrategia científica más amplia y multidisciplinaria. Los modelos animales constituyen una etapa esencial para avanzar hacia investigaciones clínicas más seguras y fundamentadas.

Conclusión

Los modelos murinos se han consolidado como una herramienta fundamental para el estudio de la endometriosis. Gracias a ellos, la investigación ha logrado esclarecer gran parte de los mecanismos biológicos que participan en el desarrollo de esta enfermedad y ha abierto nuevas posibilidades para el diseño de estrategias diagnósticas y terapéuticas más eficaces.

Si bien los modelos animales no sustituyen a la investigación clínica, representan un paso indispensable para transformar el conocimiento científico en beneficios concretos para la salud de las personas.

Más allá del ámbito biomédico, el impacto de esta investigación trasciende los laboratorios. Al demostrar científicamente la naturaleza inflamatoria de la enfermedad y el origen fisiológico

de sus síntomas, se fortalece el reconocimiento médico y social de la endometriosis. Un ejemplo de ello son las recientes iniciativas y reformas a la legislación laboral en México que buscan proteger a las mujeres que experimentan dismenorrea incapacitante.

De esta manera, el estudio de organismos modelo no solo contribuye al desarrollo de mejores tratamientos y métodos diagnósticos, sino que también favorece la construcción de una sociedad más informada, empática y comprometida con la salud y la calidad de vida de millones de mujeres.

Referencias

[1] Organización Mundial de la Salud, “Endometriosis,” 2024. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/endometriosis>

[2] P. Tragantzopoulou, “Endometriosis and stigmatization: A literature review,” SAGE Open Medicine, 2024. doi: <https://doi.org/10.1177/22840265241248488>

[3] R. O. Burney and L. C. Giudice, “Pathogenesis and pathophysiology of endometriosis,” Fertility and Sterility, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2012.06.029>

[4] K. Staley and H. Scharfman, “A woman’s prerogative,” Nature Neuroscience, vol. 8, no. 6, pp. 697–698, 2005. doi: <https://doi.org/10.1038/nn0605-697>

[5] H. Hoorsan et al., “Murine Models of Endometriosis: A Systematic Review,” International Journal of Women’s Health and Reproduction Sciences, vol. 10, no. 3, pp. 121–134, 2022. doi: <https://doi.org/10.15296/ijwhr.2022.23>

[6] E. Greaves et al., “A novel mouse model of endometriosis mimics human phenotype and reveals insights into the inflammatory contribution of shed endometrium,” American Journal of Pathology, vol. 184, no. 7, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2014.03.011>

[7] S. K. Banu, A. Starzinski-Powitz, V. O. Speights, R. C. Burghardt and J. A. Arosh, “Induction of peritoneal endometriosis in nude mice with use of human immortalized endometriosis epithelial and stromal cells,” Fertility and Sterility, vol. 91, no. 5, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.06.050>

[8] N. Bellofiore, S. Rana, H. Dickinson, P. Temple-Smith and J. Evans, “Characterization of human-like menstruation in the spiny mouse,” Human Reproduction, vol. 33, no. 9, pp. 1715–1726, 2018. doi: <https://doi.org/10.1093/humrep/dey247>

[9] H. Barker, “Lab mice can now have periods like humans,” Science, vol. 390, no. 6771, pp. 322–323, 2025. doi: <https://doi.org/10.1126/science.aed2824>

[10] R. Forster et al., “Macrophage-derived insulin-like growth factor-1 is a key neurotrophic and nerve-sensitizing factor in pain associated with endometriosis,” FASEB Journal, vol. 33, no. 10, 2019. doi: <https://doi.org/10.1096/fj.201900797R>

[11] P. Zhang and G. Wang, “Progesterone Resistance in Endometriosis: Current Evidence and Putative Mechanisms,” International Journal of Molecular Sciences, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms24086992>



CIENCIAS DE LA SALUD

Ciencia Vital, Vol. 4, No. 2, abril-junio 2026

<https://doi.org/10.20983/cienciavital.2026.02.sal.04>
e0402SAL04

CIENCIA VITAL

Revista de Divulgación Científica de la UAQ
ISSN 2601-9944

Nanomedicina de precisión

para llevar CRISPR
contra el
cáncer de mama

IB. Aldo Emiliano Zaragoza Zamora¹

Luis Gerardo González Chagoya²

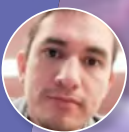
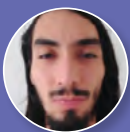
Diego Álvarez Michel³

Dr. Aldo Amaro Reyes⁴

Dra. Vanessa Vallejo Becerra⁵

Dra. Daniela Edith Salado Leza⁶

Dr. Héctor Paul Reyes Pool^{*7}



¹ Universidad Autónoma de Querétaro <https://orcid.org/0009-0003-9924-5437>

² Universidad Autónoma de Querétaro

³ Universidad Autónoma de Querétaro

⁴ Universidad Autónoma de Querétaro
<https://orcid.org/0000-0001-6520-5742>

⁵ Universidad Autónoma de Querétaro
<https://orcid.org/0000-0002-5281-4167>

⁶ Universidad Autónoma de San Luis
Potosí <https://orcid.org/0000-0001-9576-0560>

^{*7} Universidad Autónoma de Querétaro
<https://orcid.org/0000-0002-6742-3839>. hector.reyes@uaq.mx

RESUMEN

El cáncer de mama continúa siendo uno de los principales desafíos de la medicina moderna. Aunque tratamientos como la cirugía, la quimioterapia y la radioterapia han permitido aumentar la supervivencia de las pacientes, aún presentan limitaciones relacionadas con sus efectos secundarios y su falta de precisión. La terapia génica surge como una alternativa innovadora al buscar actuar directamente sobre las alteraciones genéticas que favorecen el desarrollo del cáncer. Una de las tecnologías más prometedoras es CRISPR, una herramienta de edición genética capaz de modificar regiones específicas del ADN para desactivar genes que impulsan el crecimiento tumoral o restaurar aquellos que ayudan a proteger al organismo. Sin embargo, llevar este sistema de manera segura y eficiente hasta las células cancerosas sigue siendo un gran reto. La nanotecnología ofrece una posible solución mediante el desarrollo de nanopartículas que funcionan como vehículos inteligentes, capaces de proteger y transportar CRISPR directamente al tumor. Esta combinación abre el camino hacia tratamientos más precisos, personalizados y con menos efectos adversos, representando una de las fronteras más prometedoras en la lucha contra el cáncer de mama.

Introducción

A pesar de los avances en diagnóstico y tratamiento, el cáncer de mama continúa representando un desafío complejo, marcado por su capacidad de evolucionar, resistir terapias y reaparecer incluso después de intervenciones exitosas. Esta naturaleza dinámica de la enfermedad ha puesto en evidencia una realidad fundamental: tratar el cáncer no solo implica eliminar células tumorales, sino comprender y atacar los mecanismos que las hacen persistir [1].

En respuesta a este reto, la nanomedicina ha emergido como una nueva forma de abordar la enfermedad. Definida como la aplicación de materiales y sistemas a escala nanométrica (una milmillonésima parte de un metro) en el diagnóstico y tratamiento médico, la nanomedicina permite diseñar vehículos capaces de transportar agentes terapéuticos de manera más precisa hacia los tejidos afectados, mejorando su eficacia y reduciendo sus efectos secundarios [2].

Pero ¿qué pasaría si, en lugar de atacar al tumor con fármacos externos, pudiéramos reprogramar o corregir las propias células cancerosas? Esa es la promesa de la terapia génica, la cual consiste en introducir material genético en las células del paciente para curar o combatir una enfermedad. En los últimos años, las herramientas de edición genética han surgido como una terapia prometedora, ya que buscan corregir o desactivar directamente alteraciones genéticas que son factores clave en la progresión del cáncer de mama, algo imposible de lograr con terapias farmacológicas tradicionales [3].

Hoy, esta aproximación converge con herramientas de edición genética como CRISPR (Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Espaciadas), una tecnología capaz de modificar regiones específicas del ADN (ácido desoxirribonucleico, molécula que almacena la información genética de los seres vivos). Esta herramienta funciona como un sistema de precisión que permite editar, insertar o eliminar genes defectuosos que impulsan el crecimiento tumoral. Además, facilita el estudio de los mecanismos que originan la enfermedad, la identificación de nuevas dianas terapéuticas y el desarrollo de tratamientos personalizados, especialmente en subtipos agresivos o resistentes a terapias convencionales, dando lugar a estrategias capaces de actuar directamente sobre la base molecular del cáncer [4].

En el caso del cáncer de mama, el desarrollo de vehículos nanoestructurados para la entrega de estos sistemas abre la posibilidad de intervenir genes clave en la progresión tumoral, marcando un avance hacia terapias más específicas, efectivas y alineadas con los principios de la medicina de precisión [5].

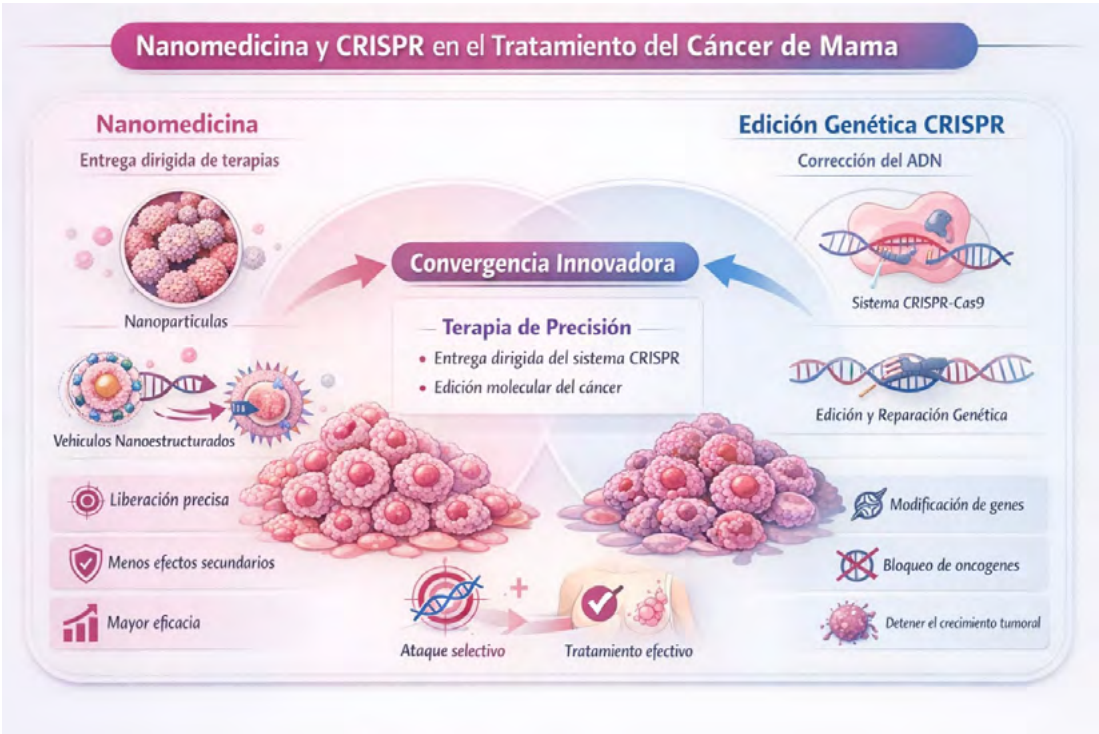


Figura 1. Convergencia entre la nanomedicina y los sistemas CRISPR para el desarrollo de terapias de precisión contra el cáncer de mama.

CRISPR como herramienta contra el cáncer de mama

El sistema CRISPR permite cortar el ADN mediante el uso de tijeras moleculares formadas por una enzima llamada Cas9, guiada por ARN (ácido ribonucleico, molécula que participa en la transmisión y expresión de la información genética). Gracias a este mecanismo es posible corregir mutaciones, activar genes supresores de tumores como BRCA1 o FOXP3, o inactivar genes que promueven el cáncer, conocidos como oncogenes. Además, esta tecnología podría utilizarse para modificar células inmunitarias del propio paciente, como las células T, con el fin de que reconozcan y destruyan de manera más precisa y duradera a las células cancerosas (Figura 2A y Figura 2B) [3,6].

Por supuesto, llevar estas ideas a la práctica no es sencillo. Editar genes en células humanas vivas presenta numerosos desafíos. Es necesario asegurar que el sistema de edición genética llegue únicamente a las células objetivo, realice modificaciones precisas sin provocar cambios no deseados y mantenga un perfil de seguridad adecuado para el paciente [6].

El sistema CRISPR-Cas permite realizar modificaciones precisas en el genoma, es decir, en el conjunto completo de información genética de una célula. Su aplicación en cáncer de mama puede seguir diferentes estrategias [7,8].

Una de ellas consiste en inactivar oncogenes mediante CRISPR-Cas9. Esta estrategia permite cortar o bloquear genes que favorecen la proliferación tumoral, como HER2, PIK3CA y MYC. Otra estrategia busca restaurar genes supresores de tumores. Genes como TP53, BRCA1 o PTEN pueden ser reparados mediante edición génica, contribuyendo a la restauración de mecanismos que frenan el desarrollo tumoral.

Asimismo, CRISPR puede utilizarse para sensibilizar las células tumorales a tratamientos convencionales mediante la desactivación de genes relacionados con la resistencia a la quimioterapia o la hormonoterapia, como ESRI. De igual manera, es posible interferir con mecanismos de evasión inmunológica mediante la modificación de genes como PD-L1, una proteína que ayuda a las células cancerosas a evitar el reconocimiento por parte del sistema inmunitario.

En todas estas estrategias, el principal reto consiste en lograr que el sistema CRISPR alcance de forma eficiente y específica las células tumorales, evitando afectar tejidos sanos. Por ello, los nanomateriales biodirigidos desempeñan actualmente un papel fundamental.

La entrega eficiente y segura de sistemas CRISPR-Cas representa uno de los mayores obstáculos para su aplicación clínica. Esta tecnología requiere transportar componentes de gran tamaño, como la enzima Cas9, y moléculas delicadas, como el ARN guía, al interior de células tumorales o inmunitarias. Además, estos componentes son susceptibles a la degradación por parte del organismo. Por ello, el desafío actual consiste en desarrollar vehículos selectivos, protectores, seguros y programables capaces de transportar y liberar estos sistemas de manera controlada.

En los últimos años, la nanotecnología biomédica ha surgido como una herramienta ideal para responder a estas necesidades mediante el desarrollo de una amplia variedad de nanomateriales con propiedades físicas y químicas adecuadas para la administración dirigida de moléculas terapéuticas, incluidos los sistemas CRISPR [9].

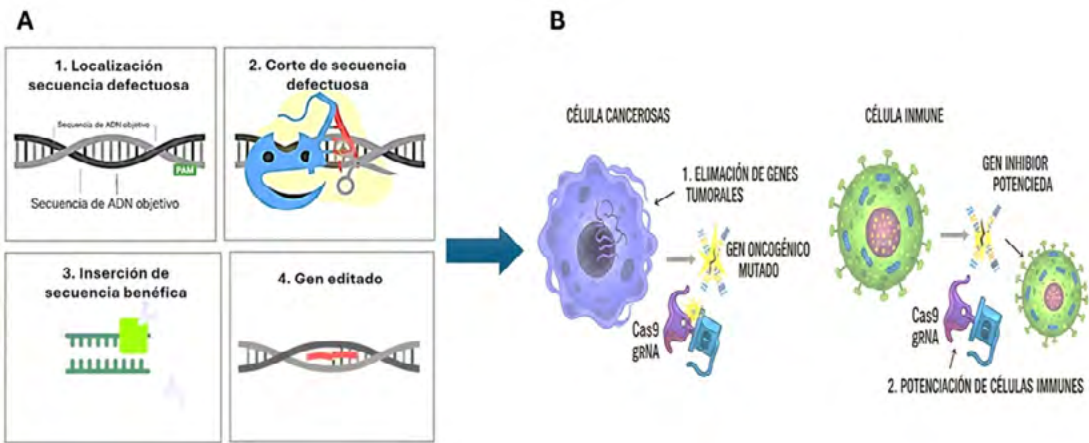


Figura 2. Edición genética mediante CRISPR y su aplicación terapéutica en cáncer mediante la inactivación o corrección de genes defectuosos a través de cortes de doble cadena realizados por la nucleasa Cas9 (A). Potenciamiento de la inmunoterapia mediante la inactivación de mecanismos que permiten a las células tumorales evadir el sistema inmunitario (B).

Nanomateriales como plataformas para la entrega de CRISPR

La nanotecnología aplicada a la medicina permite crear vehículos diminutos con la capacidad de transportar tratamientos directamente hacia los sitios donde se necesitan. Estos vehículos, conocidos como nanomateriales, son estructuras que poseen al menos una dimensión inferior a 100 nanómetros (nm), equivalentes a una milmillonésima parte de un metro, lo que les confiere propiedades físicas, químicas y biológicas únicas [10].

En el caso de CRISPR, estas plataformas pueden proteger los componentes del sistema frente a la degradación biológica, permitir una liberación controlada y programable, facilitar la internalización celular y el escape endosomal (proceso mediante el cual el material transportado logra salir de compartimentos celulares para ejercer su función), además de minimizar los efectos fuera de la célula diana (Figura 3A).

Diversos nanomateriales han sido desarrollados para cumplir estas funciones (Figura 3B) [11,12]. Entre ellos destacan las nanopartículas lipídicas, consideradas actualmente uno de los sistemas más utilizados para la entrega de ácidos nucleicos. Debido a su alta compatibilidad con el organismo y a su capacidad para interactuar con diferentes moléculas terapéuticas, estas nanopartículas se han convertido en una opción atractiva para transportar componentes de

CRISPR, como ARN guía, ARN mensajero (ARNm) y complejos Cas9-ARN guía. Su éxito en las vacunas de ARNm contra la COVID-19 impulsó significativamente su desarrollo para aplicaciones de edición genética.

Las nanopartículas poliméricas constituyen otra alternativa importante. Materiales biodegradables como PLGA (ácido poli(láctico-co-glicólico)), PEG (polietilenglicol) y quitosano pueden formar nanopartículas capaces de encapsular material genético de manera eficiente. Sus principales ventajas son la estabilidad, la biodegradabilidad y la capacidad de transportar CRISPR en forma de ADN plasmídico, ARNm o complejos proteicos.

Los nanomateriales inorgánicos también han despertado gran interés. Sistemas basados en oro, sílice mesoporosa o puntos cuánticos han sido estudiados como vehículos para CRISPR gracias a sus propiedades ópticas, térmicas y estructurales. Entre sus ventajas se encuentran la posibilidad de liberar el material genético mediante estímulos externos, como la luz, así como combinar funciones terapéuticas y diagnósticas en una misma plataforma, una estrategia conocida como teranóstica.

Por otra parte, los nanogeles constituyen una familia de estructuras tridimensionales capaces de absorber grandes cantidades de agua y responder a estímulos específicos del entorno, como cambios de pH, presencia de enzimas o especies reactivas del oxígeno. Estas características les permiten actuar como reservorios inteligentes para encapsular y liberar componentes CRISPR de forma controlada. Algunos estudios han demostrado que pueden envolver tanto la proteína Cas9 como el ARN guía, formando estructuras protectoras que liberan el sistema únicamente dentro de las células objetivo.

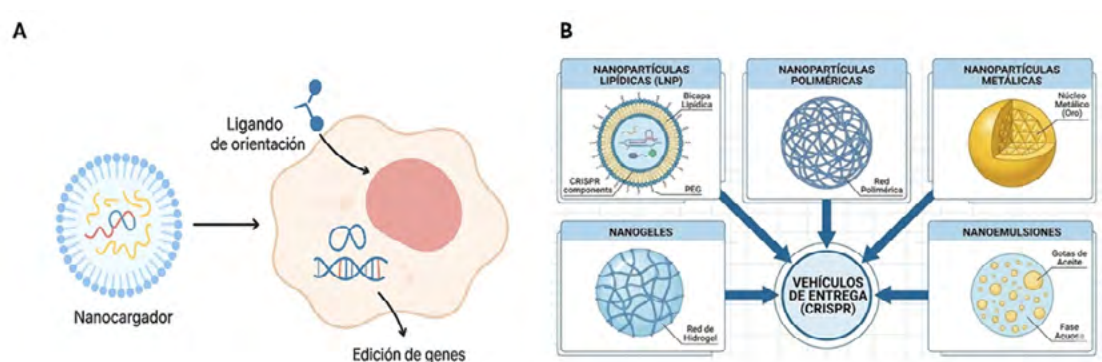


Figura 3. Entrega de un sistema CRISPR desde un nanomaterial biodirigido hacia una célula tumoral para la edición genética (A). Tipos de nanomateriales utilizados para la encapsulación y liberación dirigida de sistemas CRISPR en células de cáncer de mama (B).

La integración exitosa entre nanomateriales y sistemas CRISPR depende en gran medida del diseño de las nanoestructuras. Estas deben poseer características que favorezcan su circulación en el organismo, su penetración en tejidos tumorales, la interacción con las membranas celulares y el reconocimiento selectivo de receptores presentes en las células cancerosas, como folatos, HER2 o integrinas. Además, deben responder exclusivamente a estímulos característicos del microambiente tumoral, como variaciones de pH, actividad enzimática o temperatura, para liberar el sistema CRISPR únicamente en la célula diana.

Entre las propiedades más importantes para lograr estos objetivos se encuentran el tamaño de partícula, generalmente entre 50 y 200 nanómetros; la carga eléctrica superficial, conocida como potencial zeta; y la funcionalización mediante ligandos capaces de reconocer receptores específicos presentes en los tejidos tumorales [13].

Ventajas de usar nanomateriales frente a vectores virales

Tradicionalmente, los vectores virales han sido los principales sistemas utilizados para transportar herramientas de edición genética debido a su elevada eficiencia de entrega. Sin embargo, los nanomateriales presentan una serie de ventajas que los convierten en alternativas cada vez más atractivas [14].

Una de sus principales fortalezas es la seguridad, ya que reducen el riesgo de integración no deseada del material genético en el genoma del paciente. También ofrecen una gran flexibilidad, pues permiten transportar distintas versiones y configuraciones del sistema CRISPR según las necesidades terapéuticas.

Otra ventaja importante es su capacidad de multiplexación, es decir, la posibilidad de transportar simultáneamente varios ARN guía para editar múltiples genes en una sola intervención. Asimismo, permiten ejercer un mejor control temporal sobre la terapia gracias a mecanismos de liberación programada y transitoria.

Adicionalmente, muchos nanomateriales presentan baja inmunogenicidad, lo que significa que generan una respuesta inmunológica limitada debido a sus características fisicoquímicas. Finalmente, ofrecen ventajas desde el punto de vista de la producción industrial, ya que su fabricación puede escalar con relativa facilidad en comparación con algunos sistemas virales.

Estas características posicionan a los nanomateriales como candidatos prometedores para futuras aplicaciones clínicas de la edición genética.

Desafíos actuales

A pesar del enorme potencial de los nanomateriales en terapia génica, todavía existen importantes retos científicos, tecnológicos y regulatorios que deben superarse antes de su aplicación clínica generalizada.

Uno de los principales desafíos consiste en alcanzar una especificidad prácticamente absoluta hacia el tejido tumoral, evitando modificaciones genéticas fuera del blanco terapéutico. Asimismo, es necesario mejorar la capacidad de penetración en tumores sólidos, donde las barreras biológicas dificultan la llegada eficiente de los sistemas terapéuticos.

Otro aspecto relevante es la necesidad de establecer marcos regulatorios claros para evaluar la toxicidad, biocompatibilidad y seguridad a largo plazo de los nanomateriales. Además, la gran variabilidad biológica entre pacientes y entre los diferentes subtipos de cáncer de mama plantea desafíos adicionales para el diseño de tratamientos personalizados [15].

Futuro de la terapia génica integrando nanomateriales

La combinación de nanotecnología y edición genética está impulsando una nueva generación de terapias de precisión. En el futuro podrían desarrollarse nanotransportadores personalizados diseñados específicamente de acuerdo con el perfil genético de cada tumor, permitiendo tratamientos altamente individualizados.

También se espera el avance de sistemas CRISPR multiplex capaces de editar simultáneamente varios genes implicados en la progresión tumoral. De igual manera, las nanopartículas teranósticas podrían integrar funciones diagnósticas y terapéuticas en una sola plataforma, facilitando tanto la detección como el tratamiento de la enfermedad.

Otra línea prometedora consiste en combinar CRISPR con otras estrategias terapéuticas, como la inmunoterapia, con el objetivo de potenciar la respuesta antitumoral y superar mecanismos de resistencia que actualmente limitan la eficacia de muchos tratamientos [16].

Conclusión

El uso de nanomateriales para transportar y liberar sistemas CRISPR representa una de las estrategias más innovadoras y prometedoras en la lucha contra el cáncer de mama. La nanotecnología proporciona herramientas capaces de superar uno de los principales obstáculos de la edición genética: lograr una administración precisa, eficiente y segura de los componentes terapéuticos.

Al mismo tiempo, CRISPR permite abordar la enfermedad desde su origen molecular, ofreciendo niveles de especificidad y capacidad de intervención sin precedentes. Aunque todavía existen desafíos técnicos, biológicos y regulatorios importantes, los avances alcanzados durante los últimos años muestran un progreso acelerado hacia aplicaciones clínicas cada vez más viables.

La integración de materiales inteligentes, biología molecular avanzada y medicina de precisión tiene el potencial de transformar profundamente el tratamiento del cáncer de mama. En este contexto, los nanomateriales podrían convertirse en plataformas fundamentales para hacer realidad el potencial clínico de los sistemas CRISPR y abrir el camino hacia terapias personalizadas más seguras, eficaces y adaptadas a las características de cada paciente.

Referencias

- [1] A. Zafar, S. Khatoon, M. J. Khan, J. Abu y A. Naeem, "Advancements and limitations in traditional anti-cancer therapies: A comprehensive review of surgery, chemotherapy, radiation therapy, and hormonal therapy," *Discover Oncology*, vol. 16, art. no. 607, 2025.
- [2] D. Wu, M. Si, H.-Y. Xue y H.-L. Wong, "Nanomedicine applications in the treatment of breast cancer: Current state of the art," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 12, pp. 5879–5892, 2017.
- [3] D. Breier y D. Peer, "Genome editing in cancer: Challenges and potential opportunities," *Bioactive Materials*, vol. 21, pp. 394–402, 2023.
- [4] V. Karn, S. Sandhya, W. Hsu, D. Parashar, H. N. Singh, N. K. Jha, S. Gupta, N. K. Dubey y S. Kumar, "CRISPR/Cas9 system in breast cancer therapy: Advancement, limitations and future scope," *Cancer Cell International*, vol. 22, art. no. 234, 2022.
- [5] A. Biagioni, A. Laurenzana, F. Margheri, A. Chillà, G. Fibbi y M. Del Rosso, "Delivery systems of CRISPR/Cas9-based cancer gene therapy," *Journal of Biological Engineering*, vol. 12, art. no. 33, 2018.
- [6] H. Park, S. Yu y T. Koo, "Gene editing in cancer therapy: Overcoming drug resistance and enhancing precision medicine," *Cancer Gene Therapy*, 2025.
- [7] P. Mohanraju, K. S. Makarova, B. Zetsche, F. Zhang, E. V. Koonin y J. Van der Oost, "Diverse evolutionary roots and mechanistic variations of the CRISPR-Cas systems," *Science*, vol. 353, no. 6299, art. no. aad5147, 2016.
- [8] F. Jiang y J. A. Doudna, "CRISPR-Cas9 structures and mechanisms," *Annual Review of Biophysics*, vol. 46, pp. 505–529, 2017.
- [9] S. Tang, X. Chen, X. Tong y L. Zhu, "Overcoming the delivery challenges in CRISPR/Cas9 gene editing for effective cancer treatment: A review of delivery systems," *International Journal of Medical Sciences*, vol. 22, p. 3625, 2025.
- [10] H. Lan, M. Jamil, G. Ke y N. Dong, "The role of nanoparticles and nanomaterials in cancer diagnosis and treatment: A comprehensive review," *American Journal of Cancer Research*, vol. 13, pp. 5751–5775, 2023.
- [11] Z. Iqbal, K. Rehman, J. Xia, M. Shabbir, M. Zaman, Y. Liang y L. Duan, "Biomaterial-assisted targeted and controlled delivery of CRISPR/Cas9 for precise gene editing," *Biomaterials Science*, vol. 11, pp. 3762–3783, 2023.
- [12] M. A. Rauf, A. Rao, S. S. Sivasoorian y A. K. Iyer, "Nanotechnology-based delivery of

- CRISPR/Cas9 for cancer treatment: A comprehensive review,” *Cells*, vol. 14, art. no. 1136, 2025.
- [13] X. Liu, M. Gao y J. Bao, “Precisely targeted nanoparticles for CRISPR-Cas9 delivery in clinical applications,” *Nanomaterials*, vol. 15, art. no. 540, 2025.
- [14] M. Kim, Y. Hwang, S. Lim, H.-K. Jang y H.-O. Kim, “Advances in nanoparticles as non-viral vectors for efficient delivery of CRISPR/Cas9,” *Pharmaceutics*, vol. 16, art. no. 1197, 2024.
- [15] A. K. Dubey y E. Mostafavi, “Biomaterials-mediated CRISPR/Cas9 delivery: Recent challenges and opportunities in gene therapy,” *Frontiers in Chemistry*, vol. 11, art. no. 1259435, 2023.
- [16] S. Kumar, S. Rathaur, D. Maity, P. Varshney y J. R. Gayen, “Nanotechnology based targeted drug delivery systems for breast cancer: Challenges, recent advancement and future perspectives,” *Nanomedicine*, 2026.