

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Logros de la inteligencia artificial en México

Neurorrobótica

Cómputo afectivo como experiencia artística

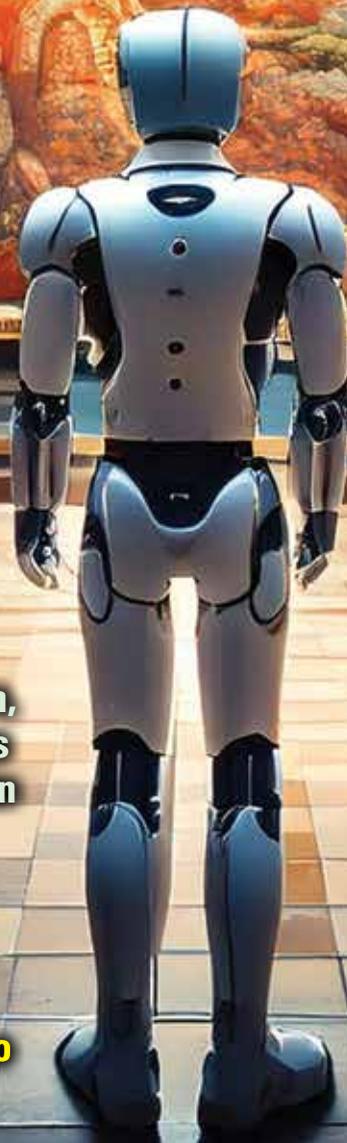
Ambientes inteligentes para apoyar el aprendizaje

Control inteligente de robots mediante gestos de la mano

Problemas y riesgos de la inteligencia artificial, y legislación para atenderlos

Deepfakes, educación, optimización, música y diseño: la IA y los procesos computacionales en la investigación en la UAM

Colores, tamaños y formas: la diversidad de los reptiles de México





CONSEJO DIRECTIVO

agosto 2023 – agosto 2026

Presidente

José Antonio Seade Kuri

Vicepresidenta

Telma Gloria Castro Romero

Tesorera

Gloria Soberón Chávez

Secretarios

Elva Guadalupe Escobar Briones

Sergio López Ayllón

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Noreste: Gloria María González González

Sección Noroeste: María Teresa Viana Castrillón

Sección Centro-Occidente: Alejandro De las Peñas Nava

Sección Centro-Sur: José Ramón Eguibar Cuenca

Sección Sur-Sureste: Dalila Aldana Aranda

Desde el Comité Editorial	3
<i>Alonso Fernández Guasti</i>	

Logros de la inteligencia artificial en México

Presentación. Los logros de la inteligencia artificial en México	6
<i>Adolfo Guzmán Arenas</i>	
Un viaje fantástico: el papel de la visión computacional para el diagnóstico médico	8
<i>Gilberto Ochoa Ruiz, Ricardo Espinosa Loera y Christian Daul</i>	
Neurrorrobótica	16
<i>Alicia Montserrat Alvarado González</i>	
Robots de asistencia social para personas con demencia	24
<i>Jesús Favela Vara y Dagoberto Cruz Sandoval</i>	
Detección inteligente de caídas para el cuidado de los adultos mayores	30
<i>Elizabeth López Lozada, Juan Humberto Sossa Azuela y Elsa Rubio Espino</i>	
Ambientes inteligentes para apoyar el aprendizaje	38
<i>Ramón Zatarain Cabada</i>	
Técnicas de inteligencia artificial para la operación de robots de servicio	46
<i>Jesús Savage Carmona y Marco Antonio Negrete Villanueva</i>	
Monitoreo de fenómenos sociales y ambientales mediante observaciones de la superficie terrestre	54
<i>Joaquín Salas, José Carlos Arenas y Antonio Briseño</i>	
Control inteligente de robots mediante gestos de la mano	62
<i>Ángel Iván García Moreno, Ángel Gabriel Salinas Martínez y Heber Isidro Morales Lugo</i>	
Juegos para el desarrollo del pensamiento computacional	70
<i>María Lucía Barrón Estrada</i>	
El cómputo afectivo como experiencia artística	78
<i>Anni Garza Lau</i>	
Problemas y riesgos de la inteligencia artificial, y legislación para atenderlos	86
<i>Adolfo Guzmán Arenas</i>	

Desde la UAM

Deepfakes, educación, optimización, música y diseño: la IA y los procesos computacionales en la investigación en la UAM	95
<i>Abel García Nájera y Mario A. De Leo Winkle, coordinadores</i>	

Novedades científicas

Colesterol en el cerebro: ¿bueno o malo?	107
<i>Julio César Domínguez Méndez y Nancy Patricia Gómez Crisóstomo</i>	
Afectaciones en el embarazo por el estrés durante la pandemia del covid-19	111
<i>Luis Hector Osorio Mercado</i>	
Camarón y agave, un coctel de salud a la vista	115
<i>Édgar J. López-Naranjo, César A. Dueñas-Bolaños y José Navarro-Partida</i>	
Síntesis de péptidos a través de maquinarias no convencionales	120
<i>Rosalba Salgado-Morales, Luis Enrique Rojas-Espinoza y Édgar Dantán-González</i>	
ADN extracelular, ¿benéfico o dañino para la supervivencia de las plantas?	128
<i>Ramón Gerardo Guevara González, Claudia Gutiérrez-Antonio y Noelia Isabel Ferrusquía-Jiménez</i>	
Colores, tamaños y formas: la diversidad de los reptiles de México	134
<i>Leticia M. Ochoa-Ochoa, Daniel G. Ramírez Arce y Juan D. Vásquez-Restrepo</i>	
Cannabis: el tránsito de una planta utilitaria a una mágica	140
<i>Felipe Vázquez-Flota y José Armando Muñoz-Sánchez</i>	

Desde las redes

¿Un secreto oculto en el cromosoma X?	146
La IA tras los errores en los papers	147
¡No lo cites! Penalización de conductas inapropiadas en la academia	148
<i>José Eduardo González Reyes</i>	

Noticias de la AMC



Portada: Generada con Adobe Firefly.



Contraportada: Shutterstock.

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 76, número 2, correspondiente a abril-junio de 2025, es una publicación electrónica trimestral, editada y distribuida por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C., con domicilio en Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Alcaldía Tlalpan, C. P. 14400, Ciudad de México, tel.: 55 5849 4905, www.revistaciencia.amc.edu.mx, rciencia@unam.mx.

Editor responsable legal: Francisco Salvador Mora Gallegos. Número de Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título: 04-2001-072510183000-102, expedido el 25 de julio de 2001; ISSN 2954-5285, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Fecha de última modificación: 24 de marzo de 2023. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371, expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de sus autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
abril-junio 2025 volumen 76 número 2

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Alonso Fernández Guasti

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero
Dalila Aldana Aranda
Raymundo Cea Olivares
Gabriela Dutrénit Bielous
Gerardo Gamba Ayala
Adolfo Guzmán Arenas
Juan Pedro Laclette San Román
Miguel Ángel Pérez de la Mora
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Alicia Ziccardi Contigiani

Editora

Rosanela Álvarez

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustradora

Ana Viniegra, pp. 25, 47, 71, 78, 87, 106, 113, 117, 136
Pixabay: pp. 3, 4, 5, 11, 15, 17, 23, 39, 43, 45, 64, 72, 88, 89, 90, 91, 92, 110, 111, 127, 132, 139, 141, 144
Shutterstock: pp. 9, 31, 35, 36
Firefly (IA generativa de Adobe): pp. 119

Red

Walter Galván Tejada

Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N,
Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México
tel.: 55 5849 4905

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Desde el Comité Editorial



Estimado lector:

Muy bienvenido a este nuevo número de la revista *Ciencia*. Como puedes ver este número consta de un 50% más de contenido, gracias al apoyo de la Universidad Autónoma Metropolitana y de su Rector General, el doctor José Antonio de los Reyes Heredia. ¡Muchas gracias!

La sección temática de este número está dedicada a la investigación y los logros en México en cuanto a la inteligencia artificial. El doctor Adolfo Guzmán Arenas, miembro del Comité Editorial de esta revista, organizó este espléndido número temático incluyendo artículos con autores y autoras de diferentes instituciones que abordan los múltiples usos que puede dársele a la inteligencia artificial.

¿Qué es la inteligencia artificial? ¿Cómo funciona? ¿Qué investigación sobre inteligencia artificial se está haciendo en México? ¿Cuáles son sus consecuencias y posibles peligros? ¿Por qué debe legislarse sobre los usos de la inteligencia artificial? ¿Qué es la ludificación? ¿A qué se refiere el término *deepfake*? ¿La inteligencia del cerebro humano será desplazada por la inteligencia artificial? ¿La inteligencia artificial puede crear arte?

Lee este número temático y encuentra las respuestas.

Desde la antigüedad el hombre ha querido crear autómatas o robots que trabajen en tareas manuales o intelectuales. Se tiene la idea de que estos robots podrían hacer estas tareas mejor que los seres humanos. Ahora estamos más cerca que nunca de este objetivo. La inteligencia artificial se creó para simular la inteligencia humana. De hecho, funciona con redes neuronales artificiales que copian el funcionamiento del cerebro humano. Sin embargo, el cerebro humano es muchísimo más complejo que la computadora más sofisticada que conocemos, pues cuenta con más de 80 000 millones de neuronas y cada neurona comparte unas 10 000 conexiones sinápticas con otras neuronas. Además, la inteligencia humana es el resultado de desarrollos biológicos y físicos que van acompañados de procesos psíquicos, sociales e incluso históricos.

Te dejo los títulos de los trabajos que encontrarás: “Un viaje fantástico: el papel de la visión computacional para el diagnóstico médico”, “Neurorrobótica”, “Técnicas de inteligencia artificial para la operación de robots de servicio”, “Control inteligente de robots mediante gestos de la mano”, “Robots de asistencia social para personas con demencia”, “Detección inteligente de caídas para el cuidado de los adultos mayores”, “Ambientes inteligentes para apoyar el aprendizaje”, “Juegos para el desarrollo del pensamiento computacional”, “Monitoreo de fenómenos sociales y ambientales mediante observaciones de la superficie terrestre”, “El cómputo



afectivo como experiencia artística” y “Problemas y riesgos de la inteligencia artificial, y legislación para atenderlos”. Cada artículo apunta a la investigación de frontera que se está realizando en México sobre estos temas. Al final de la sección temática descubre cinco ejemplos de la investigación sobre inteligencia artificial que se está haciendo en la Universidad Autónoma Metropolitana en el texto titulado: “*Deep-fakes*, educación, optimización, música y diseño: la IA y los procesos computacionales en la investigación en la UAM”. Además, en este artículo encuentra las diferentes opciones que ofrece la Universidad Autónoma Metropolitana a nivel licenciatura y posgrado relativos a cómputo e inteligencia artificial.

* * *

Después de la sección temática, te brindamos una serie de Novedades científicas que seguramente encontrarás interesantes: “Colesterol en el cerebro:

¿bueno o malo?” El colesterol cerebral es indispensable para recubrir los axones neuronales y permitir la adecuada transmisión del impulso nervioso. Cuando no existe un adecuado metabolismo del colesterol, puede promoverse el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer, Parkinson y Huntington, entre otras. El colesterol en el cerebro no es intrínsecamente bueno o malo; su función depende de un equilibrio.

En otro texto entérate de que la pandemia por covid-19 incrementó los niveles de estrés en las mujeres embarazadas debido al confinamiento, lo que provocó un mayor riesgo de cesárea, bajo peso al nacer y parto prematuro. Además, la gravedad de la infección por covid-19 en mujeres embarazadas tuvo una influencia sustancial sobre los neonatos, como trabajo de parto prematuro, bajo peso al nacer, infección neonatal y mayor ingreso a cuidados intensivos.

En el artículo “Camarón y agave, un coctel de salud a la vista” descubre que después de ponerte gotas en el ojo, el porcentaje del fármaco que permanece es menor que el 5 %, lo que provoca que los tratamientos sean costosos, largos y molestos. El empleo de nuevos materiales que incrementen el tiempo de permanencia de los fármacos es de vital importancia. La solución puede estar en los desechos del camarón y el agave. El quitosano y los nanocristales de celulosa poseen un conjunto de propiedades que los convierte en candidatos ideales para desarrollar nuevos materiales que ayuden a resolver el problema de la permanencia de medicamentos en el ojo humano.

El paradigma básico de la biología molecular nos indica que las proteínas o péptidos se sintetizan a partir del ARNm, que a su vez deriva del ADN. Sin embargo, en el artículo “Síntesis de péptidos a través de maquinarias no convencionales” puedes aprender que las péptido sintetasas no ribosomales son enzimas especializadas que sintetizan péptidos de una manera no convencional. Estas enzimas contienen múltiples módulos que se encargan de seleccionar y modificar a los aminoácidos, uniéndolos en una secuencia precisa y creando moléculas únicas con propiedades especiales.

¿Sabes qué es el ADN extracelular? ¿Es benéfico o dañino para la supervivencia de las plantas? Sigue

leyendo y aprende que el ADN extracelular es una molécula presente en una gran cantidad de ecosistemas y participa en la formación de biopelículas de bacterias y en procesos inflamatorios en animales. Estas moléculas pueden utilizarse para formular bioherbicidas y vacunas para las plantas.

El artículo titulado “Colores, tamaños y formas: la diversidad de los reptiles de México” ofrece un atisbo al fascinante mundo de la ecología funcional utilizando como ejemplo los reptiles escamados de México. Comienza con conceptos de ecología funcional y cómo estos conceptos son esenciales para entender la manera en que se conforman las comunidades o grupos de organismos que interactúan compartiendo un espacio y un tiempo. A manera de ejemplo, ofrece datos específicos de reptiles de México. Es importante enfatizar que los análisis para entender el funcionamiento de los ecosistemas a través de la diversidad funcional se aplican con otros grupos de seres vivos, como plantas, insectos y otros vertebrados.

El último texto de la sección de Novedades científicas, “Cannabis: el tránsito de una planta utilitaria a una mágica”, nos explica que las plantas de cannabis (*Cannabis sativa* L.) se reconocen principalmente

por sus efectos psicoactivos; sin embargo, el primer interés humano en ellas se debió a sus propiedades alimenticias y textiles. Los efectos psicoactivos y medicinales del cannabis no fueron descubiertos sino hasta después de su domesticación y cultivo, cambiando de manera radical la percepción respecto a sus usos. ¿Cómo sabemos esto?

En la sección Desde las redes hay tres interesantes notas: “¿Un secreto oculto en el cromosoma X?”, que plantea la pregunta: ¿por qué las mujeres viven más que los hombres y tienen mejor funcionamiento cerebral a edades avanzadas?; “La inteligencia artificial tras los errores en los *papers*”, que discurre sobre si puede usarse la inteligencia artificial para corregir los manuscritos científicos, y por último, “¡No lo cites! Penalización de conductas inapropiadas en la academia”, sobre las repercusiones del abuso sexual y de la alteración consciente de datos a través de falsificación y plagio en el número de citas que recibe un autor. Descubre los resultados sorprendentes de este tema, tan interesante como actual.

Sin duda encontrarás fascinante este nuevo número de la revista *Ciencia*.

ALONSO FERNÁNDEZ-GUASTI

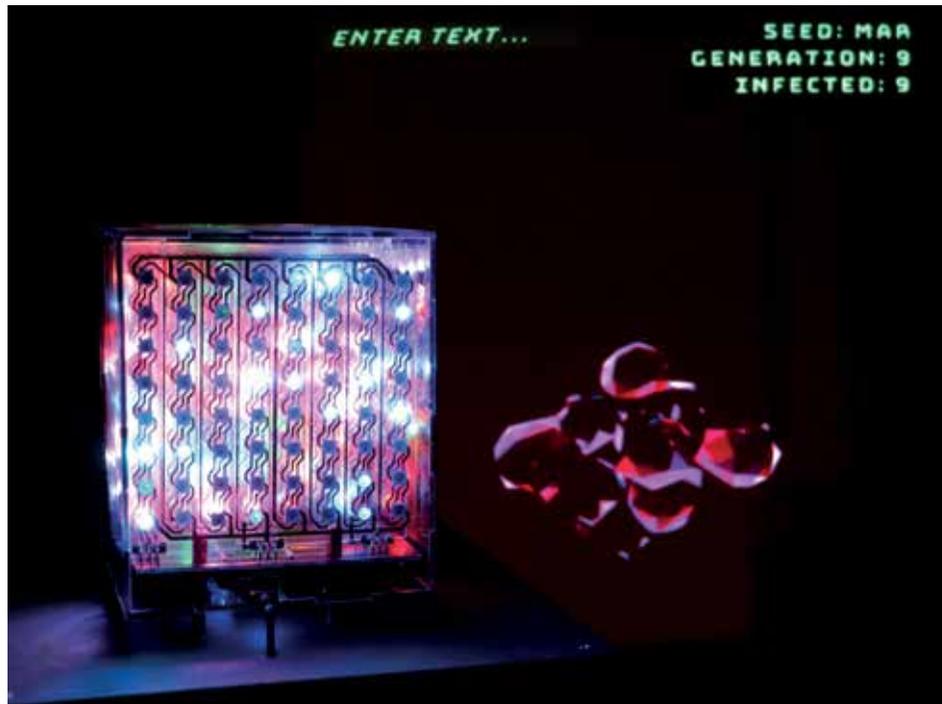


Presentación

Los logros de la inteligencia artificial en México

La inteligencia artificial es una rama de la computación. Crea algoritmos y sistemas que presentan (o pretenden presentar) las mismas capacidades que el ser humano. Por ejemplo:

- sistemas que piensan como seres humanos (toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje [se autocorrigen]);
- sistemas que actúan como humanos (robots que desarrollan tareas que hacen las personas);
- sistemas que piensan racionalmente (emulan el pensamiento lógico racional de los seres humanos [sistemas expertos]), perciben (entienden imágenes, tex-



El cómputo afectivo como experiencia artística. *Viral 2021*, ver p. 78.

to, conversaciones, sonidos), razonan y actúan en consecuencia (agentes inteligentes, demuestran sentido común).

En este número el lector encontrará muy interesantes aplicaciones y desarrollos de esta nueva rama de la computación. No hace mucho, en 1956 nació la inteligencia artificial (IA) en una reunión de investigadores en Dartmouth, EUA.

El Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, celebrado del 18 de junio al 17 de agosto de 1956, es ampliamente considerado el evento que inició la IA como disciplina de investigación. Organizado por John McCarthy, Marvin Minsky, Claude Shannon y Nathaniel Rochester, reunió a unas pocas docenas de pensadores líderes en inteligencia artificial, ciencias de la computación y teoría de la información para trazar caminos futuros para la investigación.¹

La primera conferencia internacional de LISP (un lenguaje de computación muy asociado a la IA) fue en 1963, en México, convocada por el Ing. Sergio Beltrán, director del Centro de Cálculo Electrónico de la UNAM.

La IA ha tenido altas y bajas, veranos e inviernos. Ahora está en una época gloriosa, con la aparición de las redes neuronales profundas, base de los transformadores que permiten que existan chatbots como ChatGPT. También en México se cuecen habas, como lo muestran los autores de los trabajos en este número. Si este ejemplar de *Ciencia* logra despertar el interés del lector en esta rama de la computación, habrá logrado su objetivo: divulgar el quehacer científico y provocar mayor interés y entendimiento sobre nuestros trabajos y su utilidad.

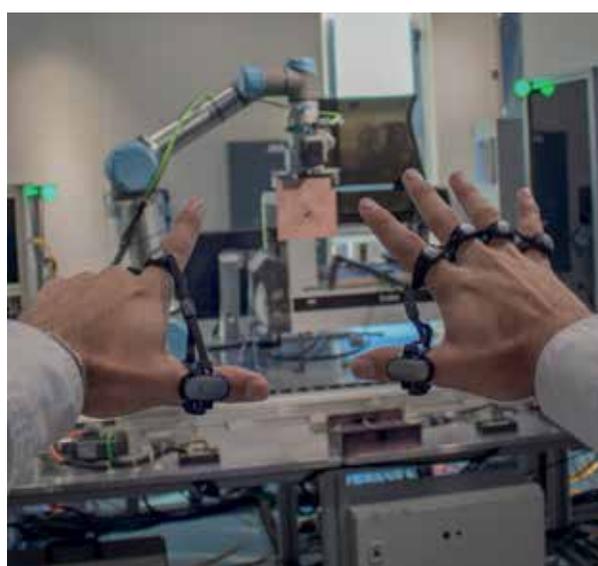
Adolfo Guzmán Arenas

Profesor/investigador del Centro de Investigación en Computación, del IPN.

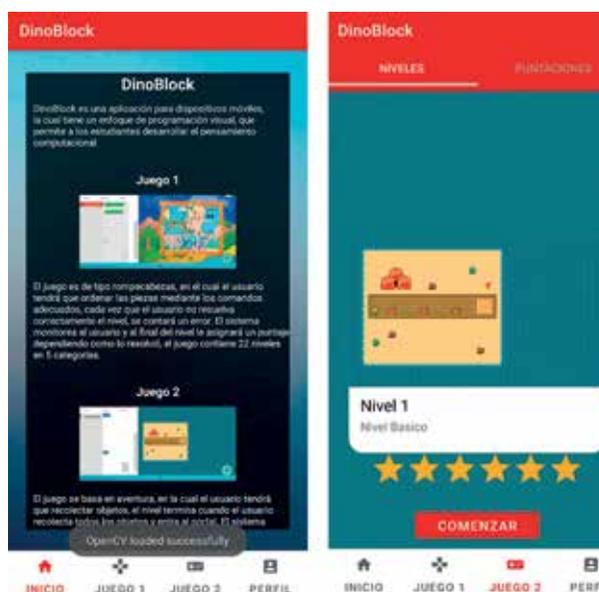
¹ Grace Solomonoff, "The Meeting of the Minds that Launched AI", *IEEE Spectrum* [en línea]. Disponible en: <<https://spectrum.ieee.org/dartmouth-ai-workshop>>.



Detección inteligente de caídas para el cuidado de los adultos mayores, ver p. 30.



Control inteligente de robots mediante gestos de la mano, ver p. 62.



Juegos para el desarrollo del pensamiento computacional, ver p. 70.

Un viaje fantástico: el papel de la visión computacional para el diagnóstico médico

La endoscopia digital es clave en diversas exámenes médicos. Sin embargo, la adopción de técnicas de IA en endoscopia para facilitar las tareas de diagnóstico está aún en su infancia. El principal reto es mejorar la robustez de los métodos de visión computacional ante los cambios de iluminación. Dichas mejoras son esenciales para aplicaciones de cartografía 3D. En este artículo discutimos el desarrollo de nuevos métodos capaces de lidiar con este tipo de artefactos en imágenes endoscópicas.

Introducción y contexto médico

Las intervenciones endoscópicas son la referencia para explorar órganos internos como el estómago y el colon (véase la [Figura 1a](#)). Estas exámenes son el único mecanismo para analizar características anatómicas (es decir, color, textura y forma) en las paredes epiteliales de dichos órganos (“Endoscopia gastrointestinal”, 2018). La información extraída es esencial para diversas tareas médicas; por ejemplo, en la detección y caracterización de lesiones (inflamatorias, precancerosas o cancerosas), así como en el seguimiento de estas lesiones. En la endoscopia, la punta de la cámara está muy cerca del tejido, lo que permite adquirir imágenes de muy alta resolución. Sin embargo, esta forma de visualizar las zonas de interés tiene serias desventajas:

1. Debido al limitado campo de vista provisto por el endoscopio, las lesiones no son observadas en su totalidad en una sola toma (Sánchez-Montes y cols., 2020). Además, el médico debe observar la zona de interés a través de una pantalla, lo cual dificulta el procedimiento ([Figura 1b](#)).
2. El campo de vista restringido es un obstáculo para conducir la inspección endoscópica de forma cómoda para el médico, quien se ve obligado a regresar de forma constante a puntos de referencia anatómicos para reconstruir mentalmente la forma del órgano en 3D y localizar las lesiones. Además, el endoscopista no puede saber si ya inspeccionó la totalidad de las zonas de interés y, aún



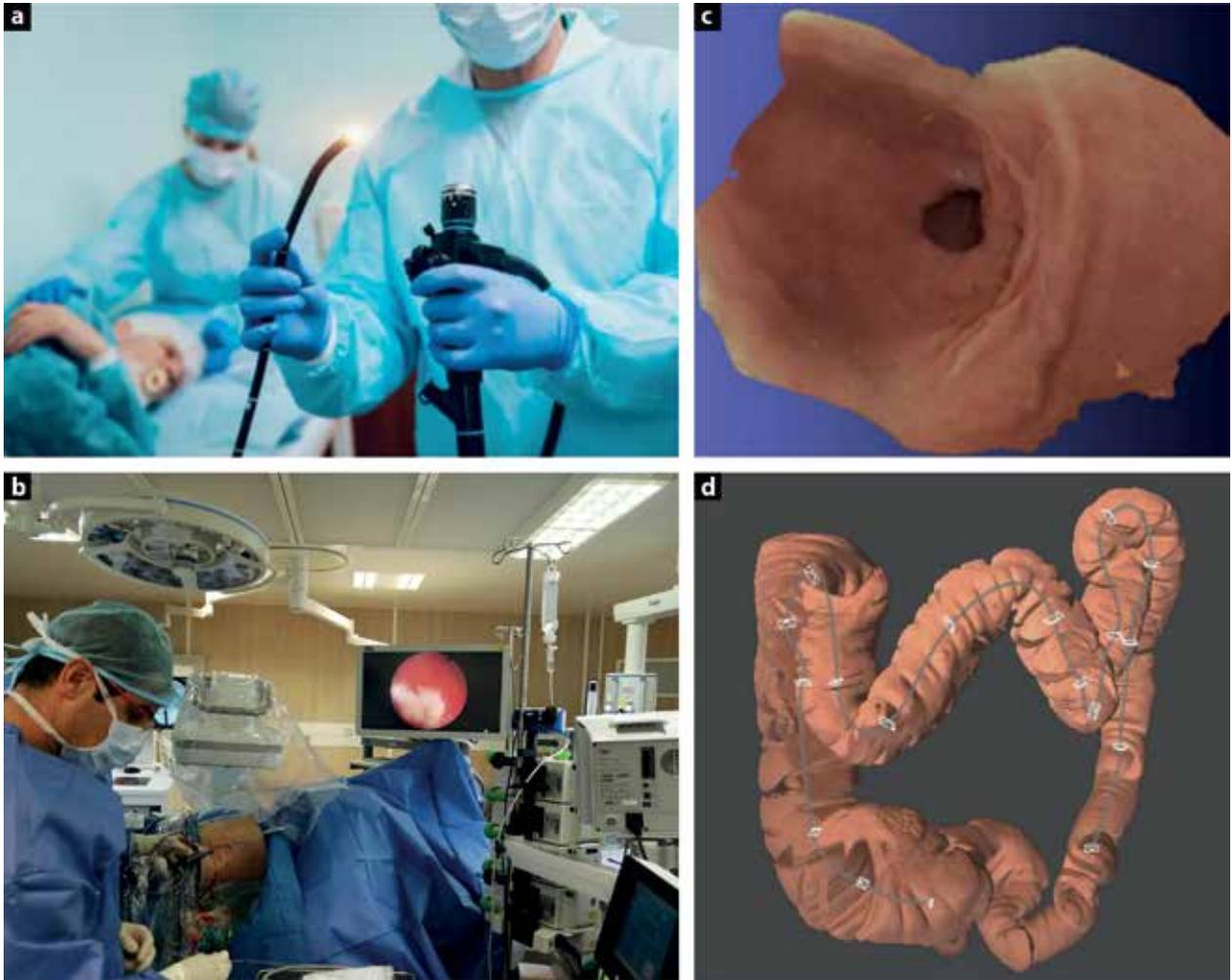


Figura 1. a) El endoscopio es un instrumento fundamental para realizar exámenes de diversas cavidades huecas, de otra forma inaccesibles. b) Sin embargo, el campo de vista limitado y la interacción a través de una pantalla dificulta las inspecciones endoscópicas y el seguimiento de las posibles lesiones. Estos problemas pueden paliarse a través del uso de: c) panoramas anatómicos digitales, o d) la construcción de mapas 3D digitales e interactivos de las zonas de interés.

Métodos de cartografía

Se usan en visión computacional para producir mosaicos de imágenes. Un mosaico de fotografías es una imagen compuesta creada uniendo una serie de imágenes contiguas (aéreas en el caso de imágenes de drones, por ejemplo). Otras aplicaciones incluyen la creación de mapas en robótica y de imágenes de vista amplia en medicina.

peor, el hecho de simplemente desplegar el video en una pantalla no permite guiar las exámenes de forma efectiva.

- Adicionalmente, el video resultante es raramente grabado. Por ende, el médico no cuenta con ningún mecanismo para llevar a cabo un segundo diagnóstico o para que otros especialistas realicen una evaluación colegiada; además de que los diversos especialistas involucrados en tratamientos de cáncer de colon o estómago (endoscopistas, oncólogos y radiólogos, entre otros) no cuentan con ningún medio de discusión común para llevar a cabo sus actividades diarias e intercambiar información valiosa (es decir, soportes digitales).

En un proyecto financiado por un fondo ecos Nord Conahcyt-Gobierno de Francia, llamado ML-inside, buscamos desarrollar nuevas herramientas de IA para mejorar las capacidades diagnósticas de la endoscopia. En particular, estamos interesados en el desarrollo de **métodos de cartografía** que permitan mejorar de forma significativa la extensión del campo de vista de escenas endoscópicas. Como se puede observar en la parte inferior de la **Figura 1**, la creación de mosaicos y mapas 3D digitales daría cabida a una visualización más completa y detallada de las lesiones, facilitando el diagnóstico durante exámenes endoscópicos, así como tareas de diagnóstico posprocedimentales.

La comparación de estos mapas construidos a partir del mismo paciente durante exámenes distintos permitiría determinar la evolución de una lesión o detectar la recurrencia de un cáncer (el riesgo de cáncer de uretra, colon o estómago es muy alto y requiere de exámenes de control regulares). Adicionalmente, estos mapas anatómicos digitales pueden ser archivados, promoviendo la trazabilidad de lesiones sospechosas. Aún más, dichos mapas pueden servir como mecanismos de soporte e intercambio entre diferentes especialistas para establecer tratamientos mejor coordinados.

Estos mapas 3D pueden servir además como un mecanismo de documentación, dado que las lesiones detectadas pueden ser resaltadas en los mapas mejorados, y métodos de explicabilidad pueden servir como un complemento diagnóstico. Nuestro proyecto busca desarrollar nuevos métodos de frontera en el área de visión computacional, automatizando tareas de análisis de video endoscópico. Sin embargo, dichas herramientas pueden ser usadas como soporte en aplicaciones como la asistencia procedimental (cirugía integrada por computadora, realidad aumentada, detección y seguimiento de instrumentos). En este artículo, nos enfocamos en la creación de mapas 3D a partir de imágenes monoculares, una activa área de investigación en diversos campos, como la robótica y la conducción autónoma, pero de reciente introducción en el área médica.

La reconstrucción 3D y los retos en endoscopia

La reconstrucción de estructuras 3D a partir de videos monoculares es un tema de amplio interés en diversas áreas de la visión artificial, la realidad aumentada y la robótica (Eddie Edwards y cols., 2022). La configuración tradicional de un sistema de reconstrucción 3D haciendo uso de imágenes monoculares se muestra en la **Figura 2a**. El uso de una sola cámara es indispensable en endoscopia, donde no es posible instrumentar el sistema de adquisición para obtener información 3D.

Los métodos de reconstrucción 3D hacen uso de mapas de profundidad como un paso necesario para obtener información geométrica de la escena



(véase la **Figura 2a**). Los métodos estéreo multivista tradicionales –como la estructura a partir del movimiento (Structure from Motion o SfM, por sus siglas en inglés) y la localización y mapeo simultáneos (Simultaneous Localization and Mapping o SLAM)– son capaces de reconstruir estructuras 3D en escenas regulares con iluminación constante entre fotografías. Sin embargo, las superficies endoscópicas son sumamente complejas debido a la falta de textura (García-Vega y cols., 2022), lo que hace que los métodos clásicos resulten insuficientes. Además, los cambios repentinos de iluminación presentes en los exámenes endoscópicos (véase la **Figura 2b**) conllevan a la generación de mapas de profundidad poco fidedignos, produciendo mapas 3D también deficientes y con zonas huecas (**Figura 2c**).

Recientemente, métodos de estimación de profundidad monoculares basados en aprendizaje supervisado (**Figura 2a**) han sido ampliamente investigados en el contexto de la endoscopia. Estos métodos heredan las ventajas clave de los métodos SfM y SLAM convencionales, evitando los problemas que afectan a los métodos tradicionales (es decir, susceptibilidad a regiones lisas o de poca textura). Por ejemplo, varios

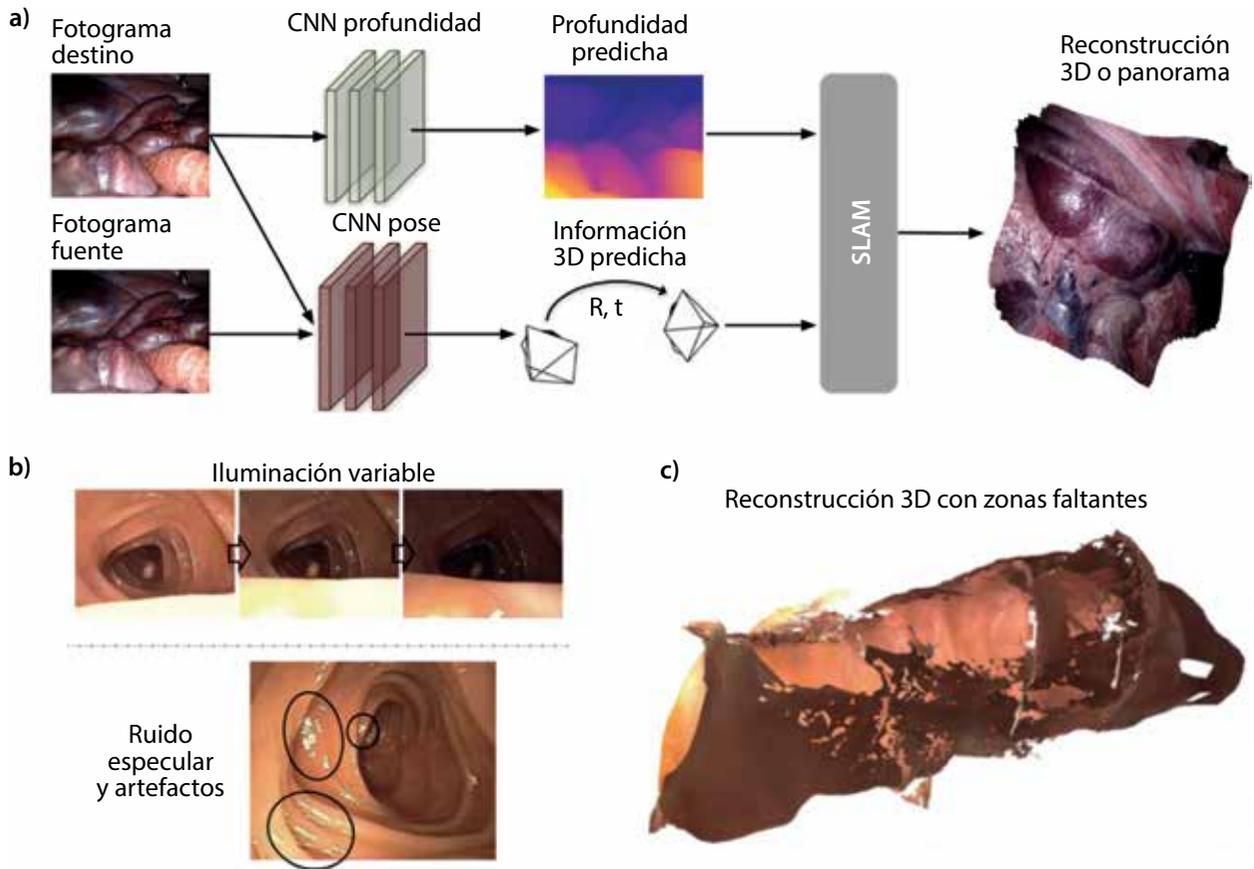


Figura 2. a) Panoramas o mapas 3D pueden ser creados entrenando modelos de IA que aprenden un mapeo entre fotogramas continuos, mapas de profundidad y la correspondiente información geométrica. b) Sin embargo, dichos modelos tienen serios problemas con cambios de iluminación súbitos y artefactos presentes en imágenes endoscópicas. c) Esto produce mapas de profundidad subóptimos y, por ende, reconstrucciones 3D incorrectas.

trabajos han aplicado redes neuronales y han logrado resultados sobresalientes en imágenes naturales. Sin embargo, estos métodos dependen de la disponibilidad de datos reales adquiridos con sensores avanzados para capturar datos en entornos reales (**verdad fundamental**, o *ground truth* en inglés). En marcado contraste, en endoscopia, este enfoque es inviable debido a los desafiantes escenarios reflectantes dentro de las cavidades humanas y dada la dificultad de instrumentar el endoscopio con sensores adicionales en condiciones realistas (Aguilera-Chuchuca y cols., 2022).

En nuestra investigación hacemos uso de técnicas de aprendizaje no supervisadas para abordar la falta de verdad de terreno necesaria para entrenar a las redes neuronales usadas en reconstrucción 3D. En nuestro método, la profundidad y la pose son predichas por una red neuronal y se utilizan para inferir el fotograma siguiente (destino) a partir del fotograma

fuente, deformando el fotograma de origen mediante el uso de una homografía. La diferencia perceptual entre el cuadro proyectado y el cuadro fuente es, por lo tanto, el principal objetivo de aprendizaje.

El principio fundamental para la autosupervisión en estos métodos es el supuesto de constancia del brillo, que supone que la intensidad del brillo entre fotogramas es constante o sin cambios repentinos. Sin embargo, en endoscopia, los métodos descritos anteriormente enfrentan desafíos específicos, pues la iluminación de la escena depende en gran medida de la orientación de la cámara en relación con la superficie del tejido, como se discutió antes y se muestra en la **Figura 2b**. Las imágenes recopiladas suelen estar subexpuestas o sobreexpuestas, según la forma de la superficie, o afectadas por reflejos especulares u otros artefactos, lo que impacta en la visibilidad de las lesiones, así como en el desempeño de los métodos

Verdad fundamental

Término usado en aprendizaje automático y visión artificial, entre otras áreas; es información que se sabe que es real o verdadera, proporcionada por la observación y medición directa, a diferencia de la información proporcionada por inferencia.

de reconstrucción 3D (véase la **Figura 2c**). En este sentido, nuestro trabajo busca desarrollar métodos menos susceptibles a dichos cambios fotométricos, como se detalla a continuación.

Método propuesto

La estimación de la profundidad monocular auto-supervisada en imágenes endoscópicas es un desafío debido a las superficies de baja textura y las difíciles condiciones de iluminación. Estos factores hacen complejo el entrenamiento de los modelos, pues la iluminación irregular en el video de entrada genera problemas de convergencia o produce predicciones de profundidad inexactas. Estas variaciones afectan también los resultados durante su uso en tiempo real.

Diversos trabajos han empleado mecanismos de ajuste de iluminación lineales y no lineales. Aunque estos métodos han tenido resultados prometedores, estas estrategias se basan en suposiciones específicas sobre las variaciones de apariencia subyacentes al modelo, así como el movimiento que se puede encontrar entre fotogramas. Sin embargo, las imágenes endoscópicas presentan características complejas que son difíciles de capturar completamente en un modelo. Con el fin de mitigar este problema, en nuestro método introducimos una nueva función de pérdida,

haciendo uso de descriptores invariantes a la iluminación, sin modificar el esquema prototípico de estimación de profundidad. Nuestro enfoque está resumido de forma conceptual en la **Figura 3**.

Esta novedosa formulación está inspirada en los descriptores de vecindario (ND), que han demostrado su eficacia para el cálculo del flujo óptico bajo grandes cambios de iluminación y en escenarios de baja textura. Con el fin de robustecer la señal de autosupervisión contra cambios de iluminación, extendemos la ampliamente usada pérdida de similitud estructural (Structural Similarity Index Measure o SSIM) agregando la diferencia entre las características invariantes de iluminación extraídas de la imagen de origen y el objetivo como señal secundaria. En segunda instancia, hacemos uso de una transformación neural de intensidad a nivel pixel para lidiar mejor con zonas de poca textura, que producen predicciones borrosas en zonas con cambios abruptos de gradiente.

Nuestro método rectifica la pérdida de calidad en la predicción de profundidad, lo que le permite guiar eficazmente el entrenamiento en las difíciles condiciones de los videos endoscópicos, como puede observarse en la **Figura 4**, y así producir mejores resultados en la predicción de profundidad, a pesar de múltiples **artefactos** (fila 1, cambios por movimiento

Artefactos
Se dice de errores o alteraciones engañosas o confusas en los datos o la observación; en el contexto de la visión computacional para procesamiento de imágenes endoscópicas, alude a alteraciones en la imagen digital producidas por anomalías debidas al sistema de adquisición, cambios de iluminación y otros procesos físicos.

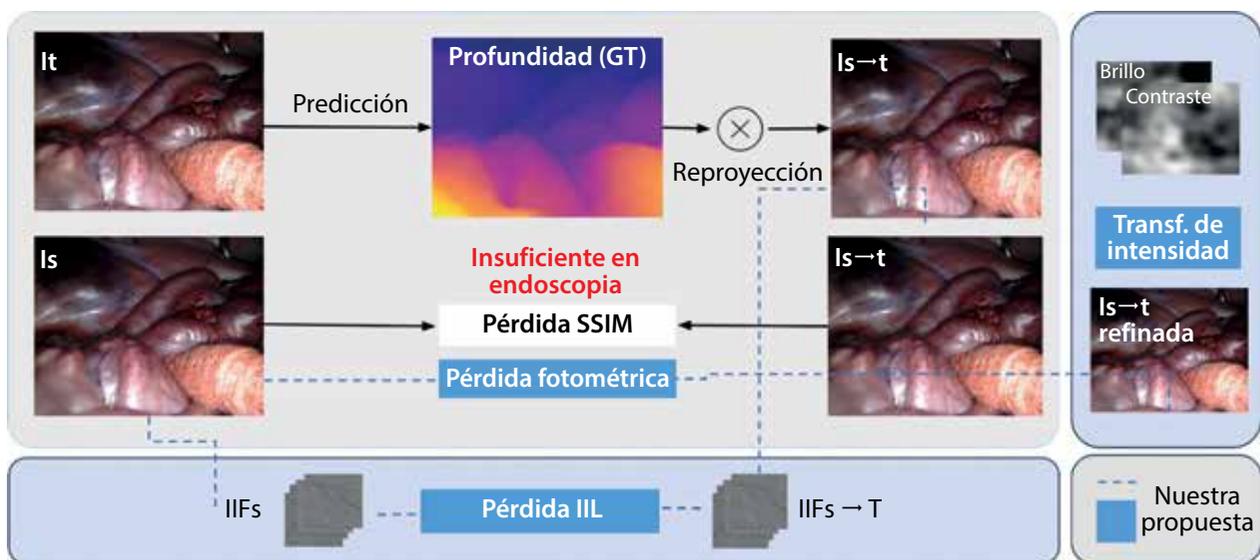


Figura 3. El método propuesto está basado en un esquema de aprendizaje profundo autosupervisado, en el que señales de entrenamiento auxiliares a la pérdida clásica (SSIM) guían a la red a predecir la profundidad de forma robusta, invariante a la iluminación.

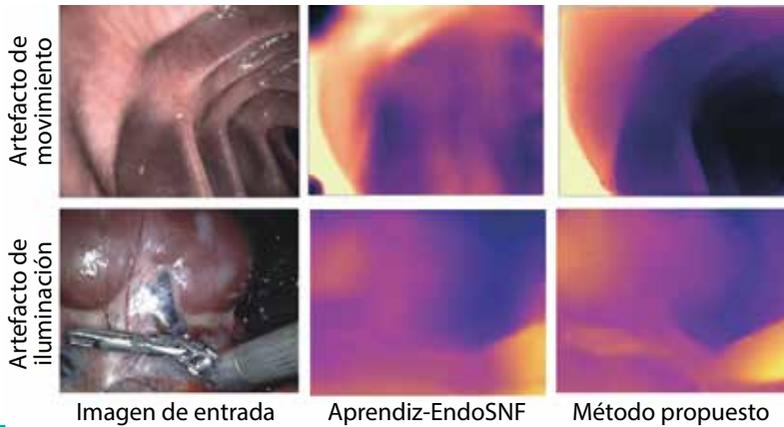


Figura 4. El método propuesto es capaz de producir mapas de profundidad fidedignos (última columna), aun en la presencia de artefactos por movimiento en la imagen de entrada (primera fila), o en el caso de presencia de cambios de iluminación o reflejos especulares, en comparación con los resultados obtenidos por un método del estado del arte (columna central).

súbitos, fila 2, artefactos de iluminación) comparados con otros métodos del estado del arte.

Nuestro modelo consta de módulos de estimación de profundidad, de movimiento y de calibración de cambio de iluminación. Para mejorar el módulo de predicción de profundidad, empleamos una ar-

quitectura que combina información local y global mediante la combinación de bloques CNN y Transformer. El módulo de calibración de cambio de iluminación ajusta la intensidad del brillo desde el cuadro fuente compensando los cambios de iluminación a nivel pixel.

Resultados

Nuestros experimentos en diferentes conjuntos de datos de referencia muestran que las funciones de pérdida propuestas son capaces de lidiar con cambios de iluminación y producir mapas de profundidad fidedignos (véase la **Figura 4**). Para evaluar la calidad de los mapas de profundidad utilizamos métricas de fidelidad de señales e imágenes (el SSIM, o el radio de señal a ruido: PSNR) que miden la similitud entre el mapa de profundidad predicho contra una imagen de verdad de terreno, buscando minimizar distorsiones perceptuales.

Como se puede observar en las **Figuras 5a y 5b**, el mejoramiento del mapa de profundidad conlleva a

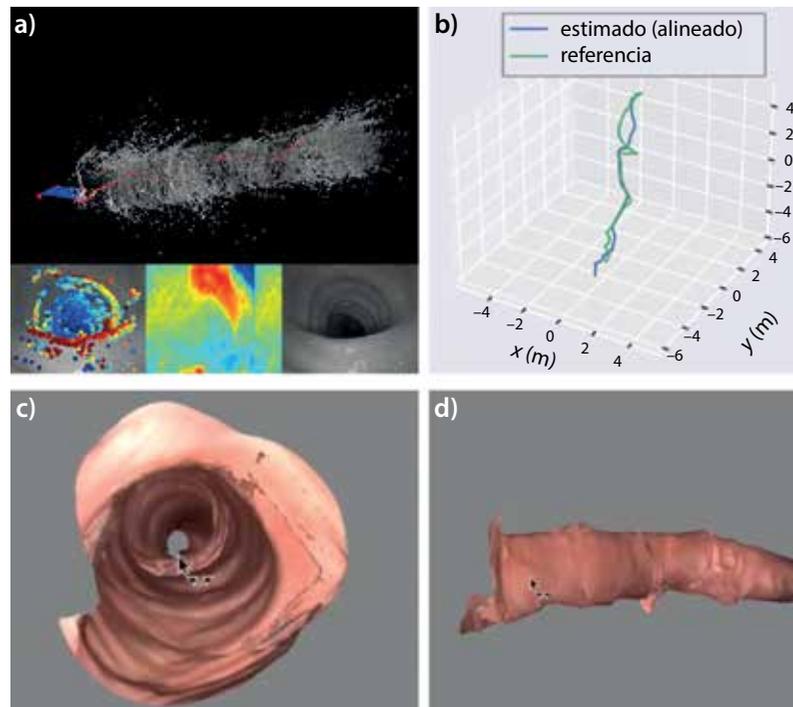


Figura 5. El método propuesto fue integrado en un esquema de reconstrucción 3D usando SLAM para endoscopia. Los resultados de este ejemplo de un segmento de colon muestran que el método es capaz de producir: *a*) una mejor estimación de la nube de puntos, y *b*) un mejor desempeño en el proceso de rastreo de puntos de interés, así como *c*) reconstrucciones 3D en tiempo real, y *d*) mapas 3D con menos valores atípicos y zonas faltantes debido a los cambios de iluminación.

una menor dispersión en las nubes de puntos estimados por los métodos de SLAM (producidos durante el proceso de reconstrucción 3D), así como a un mejor rastreo de la trayectoria con respecto a una referencia base, obtenido usando SfM (Figura 5b), lo cual permite generar mejores mapas tridimensionales en tiempo real (Figura 5c) que contienen menos huecos (Figura 5d).

Gilberto Ochoa Ruiz

Tecnológico de Monterrey, Guadalajara, México.
gilberto.ochoa@tec.mx

Ricardo Espinosa Loera

Universidad Panamericana, México; Université de Lorraine, Francia.
respinosa@up.edu.mx

Christian Daul

Université de Lorraine, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, Francia.
christian.daul@u-lorraine.fr

Lecturas recomendadas

Aguilera-Chuchuca, M. J., S. A. Sánchez-Luna, B. González Suárez, K. Ernest-Suárez, A. Gelrud y T. M. Berzin (2022), “El papel emergente de la inteligencia artificial en la endoscopia gastrointestinal: una revisión de la literatura”, *Gastroenterología y Hepatología*, 45(6):492-497.

Eddie Edwards, P. J., D. Psychogyios, S. Speidel, L. Maier-Hein y D. Stoyanov (2022), “SERV-CT: A Disparity Dataset from Cone-Beam CT for Validation of Endoscopic 3D Reconstruction”, *Medical Image Analysis*, 76. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102302>>, consultado el 18 de enero de 2025.

“Endoscopia gastrointestinal” (2018), *Revista de Gastroenterología de México*, 83:90-92. Disponible en: <<https://www.revistagastroenterologiamexico.org/es-endoscopia-gastrointestinal-articulo-X037509061863283X>>, consultado el 18 de enero de 2025.

García-Vega, A., R. Espinosa, G. Ochoa-Ruiz, T. Bazin, L. Falcón-Morales, D. Lamarque y C. Daul (2022), “A Novel Hybrid Endoscopic Dataset for Evaluating Machine Learning-Based Photometric Image Enhancement Models”, *Advances in Computational Intelligence*, pp. 267-281.

Sánchez-Montes, C., A. García-Rodríguez, H. Córdova, M. Pellisé y G. Fernández-Esparrach (2020), “Tecnologías de endoscopia avanzada para mejorar la detección y caracterización de los pólipos colorrectales”, *Gastroenterología y Hepatología*, 43(1):46-56.



Alicia Montserrat Alvarado González

Neurorobótica

En neurorobótica se desarrollan sistemas autónomos modelados con base en algún aspecto del sistema nervioso central. En particular, toma en cuenta que el cerebro no es un órgano aislado del resto del cuerpo y que ambos interactúan en un entorno complejo. Tales modelos nos permiten comprender las funciones neuronales y cognitivas de los seres vivos para desarrollar inteligencia artificial.

Introducción

La neurorobótica estudia la conexión entre el cerebro, el cuerpo y el entorno en el que interactúan, para construir robots cuya respuesta muestre comportamientos complejos. Los estudios se basan no sólo en humanos, sino también en otros animales.

También busca usar a los robots como una herramienta para estudiar las funciones neuronales (tanto anatómicas como del comportamiento) en una forma holística; es decir, uniendo distintas ciencias, como la inteligencia artificial, la robótica, las neurociencias y las ciencias cognitivas, por mencionar algunas.

Modelos basados en el sistema nervioso central

A mediados del siglo xx, Grey Walter, un neurólogo cuya afición era la robótica, le mostró al mundo su robot Tortoise. El robot estaba diseñado con sensores de luz analógicos que le indicaban el origen de una fuente de luz intensa. El robot se dirigía hacia la luz y se mantenía ahí, indefinidamente. Contaba con una carcasa tipo caparazón que servía como un detector de colisiones, ya que, al ser presionado, activaba un circuito que cortaba momentáneamente la corriente eléctrica hacia los actuadores para detenerse. Acto seguido, el robot generaba movimientos aleatorios hasta que lograba evadir el obstáculo. Este comportamiento era aparentemente complejo y muy similar a algunos sistemas biológicos, como el de algunos insectos.

Más adelante, a finales de los ochenta, Rodney Brooks propuso la arquitectura de subsunción. Esta arquitectura tenía como objetivo crear criaturas artificiales capaces de habitar en un mundo real y no en un mundo simplificado o simulado, que



es el tipo de problemas que la inteligencia artificial trataba de resolver en esa época. Para ejemplificar su arquitectura, proponía el caso del comportamiento de una mosca. Una mosca tiene cierta inteligencia, pero es muy probable que no cree descripciones o modelos tridimensionales de los objetos que sobrevuela, que razone respecto a los humanos que la rodean y que la quieren matar, que piense acerca de sus deseos u objetivos de vida, ni que realice un estudio sobre cuál es el mejor sitio donde depositar sus huevos. Brooks sospechaba que era más probable que la mosca tuviese una conexión directa entre sensores y actuadores, comportamientos preestablecidos o preaprendidos, y ciertas herramientas simples de navegación. Es decir, la complejidad cognitiva de los comportamientos de la mosca es menor que aquella que buscaba modelar la inteligencia artificial clásica. Y, aún así, es más eficiente moviéndose en el mundo real que cualquiera de los modelos existentes.



En otras palabras, la inteligencia artificial clásica buscaba modelar comportamientos que reflejaran una gran complejidad cognitiva, pero han logrado funcionar en entornos poco complejos. En contraste, las arquitecturas basadas en comportamientos, o en sistemas reactivos, modelan comportamientos con una complejidad cognitiva baja, pero funcionan bien en entornos con una complejidad alta. Así, la arquitectura de subsunción que propuso Brooks sería similar al procesamiento cortical que regula los comportamientos que no podemos controlar, o de los que no somos conscientes (por ejemplo, el hambre o las funciones neuroendocrinas).

Por otro lado, a principios de los noventa, el grupo liderado por Gerald Edelman desarrolló un modelo en el que simulaban un sistema nervioso artificial con detalles anatómicos. Este modelo lo implementaron en un robot conocido como Darwin V y lograron que aprendiera a tener preferencias. Posteriormente, uno de sus estudiantes, Krichmar, lideró un grupo en donde crearon un nuevo modelo que implementaron en varias versiones del robot Darwin. Este modelo consistía en representar la interacción entre la corteza entorrinal y el hipocampo. La corteza entorrinal es una parte del cerebro que se encarga de formar y consolidar recuerdos, reconocer estímulos, integrar la información de los sentidos, navegar espacialmente orientando nuestro cuerpo respecto al resto del mundo y enviar y recibir información de la corteza al hipocampo. Por su parte, el hipocampo está asociado a la navegación espacial, a consolidar algunos tipos de memoria y a mejorar las respuestas sensoriales.

A partir de este modelo emergieron células de lugar en el hipocampo simulado. También lograron trazar la ruta desde el inicio de la respuesta del hipocampo hasta los datos sensoriales que llevaron a esa respuesta, así como la respuesta de la memoria espacial y de la memoria episódica. Para probar su modelo, pusieron a sus robots a andar sobre un laberinto con el objetivo de que llegaran a una meta. Como resultado, observaron que los robots crearon rutas sinápticas para llegar a nuevos lugares, así como para recordar lugares que les eran familiares. Ninguno de los robots resolvía el laberinto de la misma forma,

pero en todos los casos lograron hacerlo. Por otro lado, se dieron cuenta de que diferentes conjuntos de neuronas lograron activar un mismo grupo de células de lugar. Esto es importante porque, si una “zona cerebral” del robot se dañara, de todas formas, el robot podría encontrar la meta. Para comprobarlo, simulamos el daño físico de algunos sensores y, aún así, el robot logró resolver el laberinto.

Posteriormente, en los primeros años del siglo XXI, el grupo de Prescott desarrolló un modelo para seleccionar acciones simulando los ganglios basales. Los ganglios basales están encargados del control voluntario de los movimientos y de monitorear las cadenas de movimientos memorizados. Este modelo fue implementado en un robot con “bigotes” como de roedor, llamado Whiskerbot (Pearson y cols., 2011).

En esos mismos años, Ijspeert y su grupo desarrollaron redes neuronales evolutivas para que una salamandra robótica aprendiera diferentes patrones de movimiento. Tales patrones no fueron programados manualmente; en contraste, la entrada del algoritmo era la información de los sensores del robot interactuando en un entorno específico. Y, dado que el robot estaba configurado para simular el tronco encefálico y la médula espinal de una salamandra, las salidas del algoritmo eran controladores que emulaban sus movimientos.

Por su parte, en el grupo liderado por Floreano han desarrollado algoritmos evolutivos desde el 2010 para implementar redes neuronales que permitan generar una gran cantidad de comportamientos, desde navegar por laberintos hasta desarrollar estrategias tipo depredador-presa (Floreano y Keller, 2010). La estrategia es la siguiente: definen un genoma, es decir, un controlador generado con una red neuronal; la red neuronal tiene como entrada la información sensorial y como salida la información que controla a los actuadores. Esta estrategia es similar al trabajo de Ijspeert, sólo que los genomas pueden definir directamente los pesos de la red e indirectamente las reglas de plasticidad y topología. La aptitud se basa en el desempeño de una tarea. Luego se seleccionan los mejores controladores de las redes neuronales. Esta población puede estar sujeta, a su vez, a mutación

o a cruzamiento para ir evolucionando hasta generar individuos más aptos cada vez. Ésta es una línea de investigación de la que, hasta la fecha, han surgido cientos de investigaciones. Entre ellas, las que llevamos a cabo en el grupo de investigación que dirijo junto con el doctor Antonio López Jaimes, como el diseño de trayectorias de un brazo robótico o neurocontroladores robóticos. Por ejemplo, en el 2018, presentamos una estrategia de navegación autónoma de robots, similares a coches, basada en un enfoque cognitivo. Propusimos una evolución simultánea de neurocontroladores basados en un algoritmo genético para ajustar los parámetros (pesos) de una red neuronal y así controlar múltiples robots simulados que competían entre ellos (véase la [Figura 1](#)).

Actualmente, estamos desarrollando una arquitectura cognitiva inspirada en el funcionamiento de las cortezas: motora primaria, motora secundaria, premotora y el lóbulo temporal. Cada uno de estos módulos desempeña funciones motoras adaptativas para la ejecución de movimientos, basada en la metodología explicada en la [Figura 1](#) y aplicada a nuestro robot Xolobot (véase la [Figura 2](#)).

Por otro lado, en el grupo de José Negrete y Martínez, de la Universidad Veracruzana, crearon

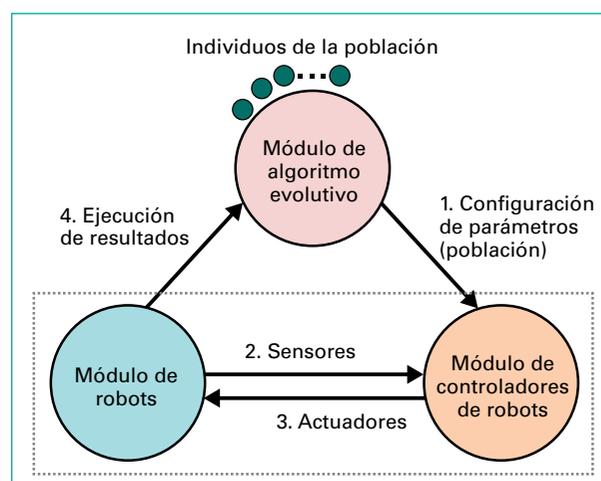


Figura 1. Metodología de los neurocontroladores: el módulo de algoritmo evolutivo (MAE) genera una población de vectores de pesos que son enviados al módulo de controladores de robots (MCR) para su evaluación (1) y ordena al módulo de robots (MR) que se inicie. El MR envía, cada pocos milisegundos, los valores de los sensores de los robots al MCR (2), que, a su vez, envía los valores de los actuadores del robot (3). Cuando se cumple el criterio final, el MR envía al MAE los resultados de rendimiento de cada robot para evaluar a la población (4).



Figura 2. Xolobot: robot con brazos antropomorfos controlado con la arquitectura cognitiva cerebral, inspirada en el sistema nervioso central.

un neurocráneo con módulos esqueléticos, motores, premotores, sensoriales y de integración (Negrete-Martínez y cols., 2016). La modularidad funcional que implementaron reforzaba la idea de que hay un cerebro específico para cada cuerpo. Negrete también desarrolló una arquitectura que permitía que su robot llevara a cabo dos tareas: controlar el motor de una articulación y estimar la distancia entre un sensor (colocado en la mano del brazo) y un punto de referencia. Si la distancia era diferente a un umbral, el módulo accionaba el motor en la dirección correctiva. Si el movimiento no producía un cambio significativo en la distancia, el módulo se autoinhibía y permitía que cualquier otro módulo tomara el control de la actividad motriz. El comportamiento general del robot corresponde a un comportamiento de atención que propicia una inducción de acción en lugar de una selección de acción (véase la **Figura 3**).

Adicionalmente, el grupo de Bruno Lara, del Centro de Investigación en Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, ha hecho un esfuerzo por mostrar que el aprendizaje sensoriomotor, la representación interna del cuerpo y las simulaciones sensoriomotoras internas son necesarias

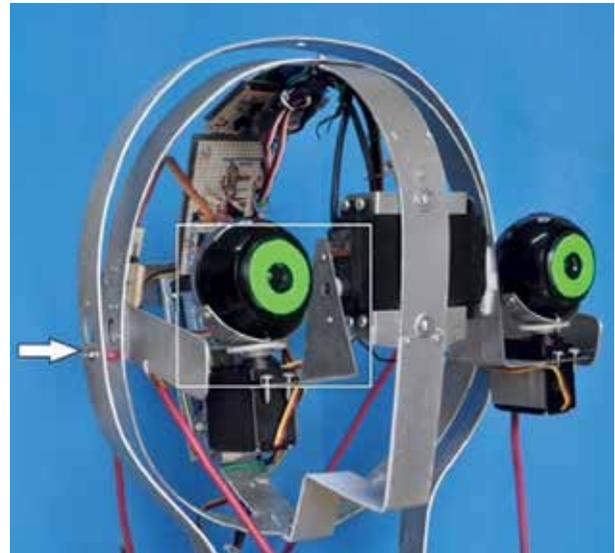


Figura 3. Neurocráneo con módulos esqueléticos, motores, premotores, sensoriales y de integración. Foto: José Negrete Martínez.

tanto en el desarrollo de agentes artificiales como en la investigación del desarrollo mental autónomo. Para ello, desarrollaron un esquema donde las potencialidades para la interacción del agente con el mundo no están ni en el agente ni en el objeto, sino en la experiencia del agente al interactuar con el ambiente (Lara y cols., 2021).

Hardware neuromórfico

Por otro lado, también se está desarrollando *hardware* especializado en neurorrobótica (en general, en neurociencias computacionales), al que se le conoce como *hardware* neuromórfico y está inspirado en el cerebro para construir arquitecturas computacionales y sensores. La ventaja de este *hardware* es que puede soportar redes neuronales a escala cerebral mientras que utiliza muy poca energía. Es decir, puede soportar las redes neuronales profundas, que abundan actualmente, y pueden implementarse, por ejemplo, en dispositivos móviles.

Por ejemplo, Loihi es un *hardware* neuromórfico (diseñado por Intel) especializado en ejecutar impulsos neuronales (Davies y cols., 2021). Es asíncrono, lo que permite implementar computación en paralelo. Tiene tres módulos principales que simulan las sinapsis, las dendritas y el axón. Adicio-

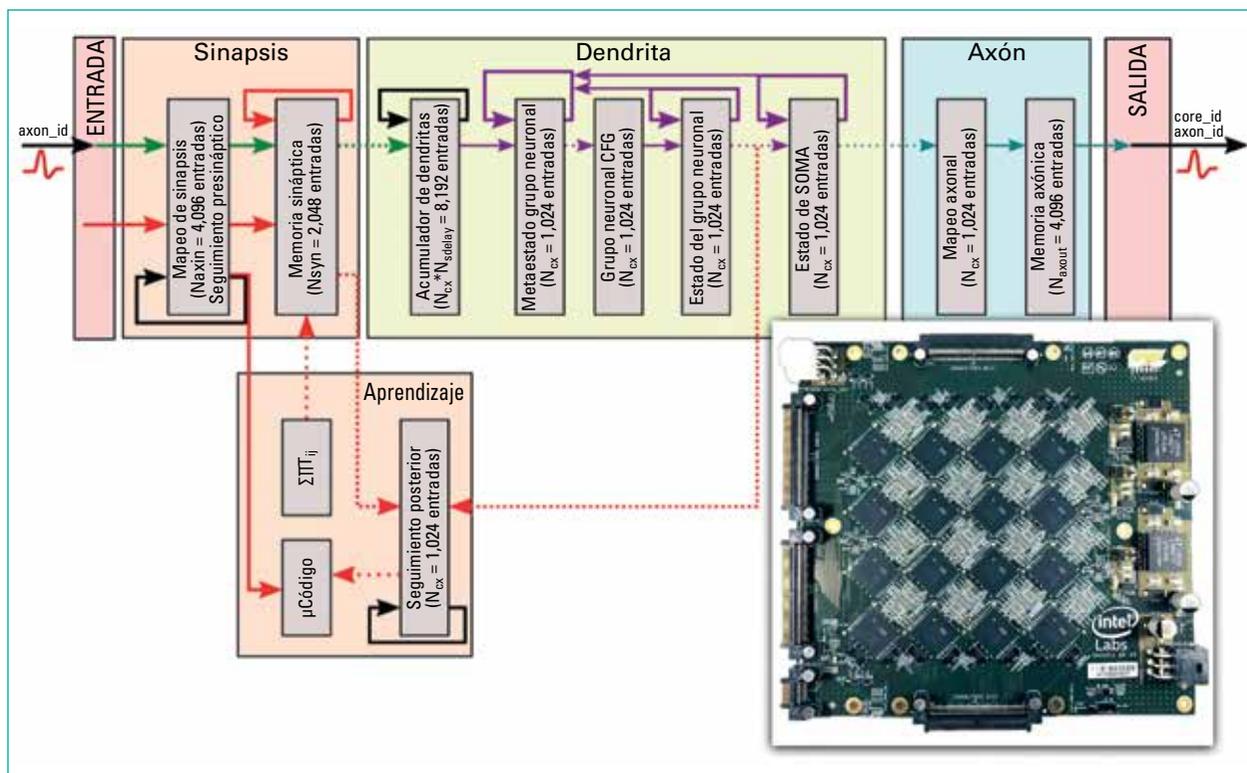


Figura 4. Imagen de la tarjeta Nahuku de Intel y diagrama del *hardware* neuromórfico Loihi. Crédito: Intel.

nalmente, tiene un módulo programable en el que se pueden implementar el aprendizaje y las inferencias. A este módulo lo llaman motor de aprendizaje. Cada chip tiene núcleos que pueden procesar cierto número de neuronas y de sinapsis (véase la Figura 4).

Hay por lo menos cinco circuitos de esta línea: Kapoho Bay, Wolf Mountain, Nahuku, Pohoiki Beach y Pohoiki Springs. Esta lista está ordenada de menor a mayor cantidad de chips, sinapsis y neuronas. Por ejemplo, Kapoho Bay (liberado en 2018) tiene hasta 2 chips, 260 millones de sinapsis y 262 mil neuronas. Mientras que Pohoiki Springs (liberado en 2020) tiene 768 chips, aproximadamente 100 mil millones de sinapsis y cerca de 100 millones de neuronas.

IBM también tiene una línea de *hardware* neuromórfico llamada TrueNorth (2020) para investigación. Es un motor de inferencia de redes de impulsos neuronales paralelas que contiene un millón de neuronas y 256 millones de sinapsis de baja precisión.

En México, hay varios grupos que desarrollan e implementan *hardware* neuromórfico en robots. Por ejemplo, José Hugo Barrón Zambrano y César Torres Huitzil, del Cinvestav-Tamaulipas, han desarrollado un controlador de locomoción para producir patrones o pasos de locomoción rítmicos para robots con piernas, como cuadrúpedos y hexápodos. Otro ejemplo es el grupo de Horacio Rostro González, de la Universidad de Guanajuato, que ha implementado sistemas neuromórficos en robots zoomórficos y humanoides.

■ Plataformas de desarrollo

■ También existen plataformas de código abierto que permiten la implementación de modelos como los descritos anteriormente. Un ejemplo es el iCub, un robot humanoide que ha sido desarrollado para la investigación de la cognición humana y de la inteligencia artificial. Fue desarrollado por el consorcio RobotCub, en el que participan varias universidades europeas (véase la Figura 5).

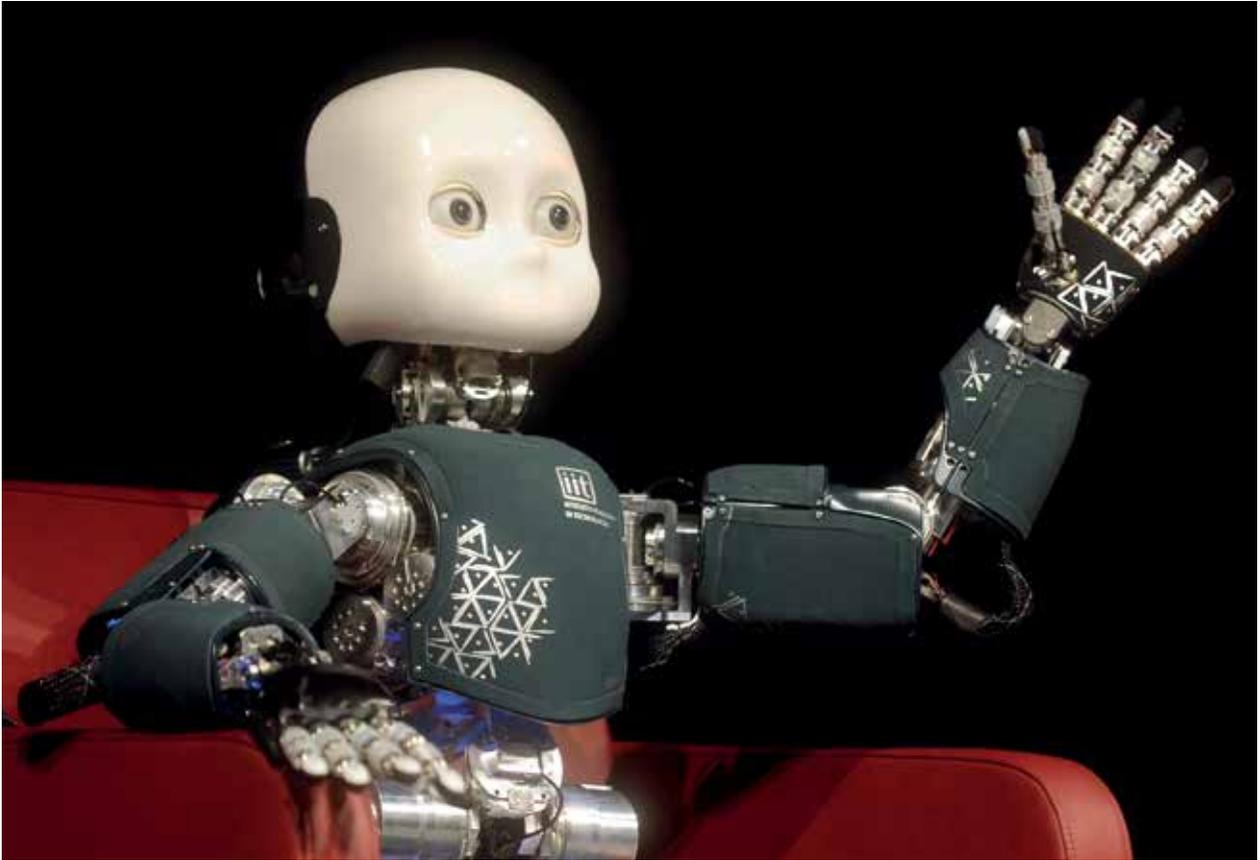


Figura 5. iCub es un robot humanoide de código abierto y robótica que se utiliza en la investigación de cognición humana e inteligencia artificial. Imagen: Niccolò Caranti.

iCub, y su versión simulada, es uno de los robots utilizados por la Neurobotics Platform,¹ financiada por el Human Brain Project.² Ésta es una plataforma de simulación en la que se pueden elegir diferentes modelos cerebrales, construir modelos propios, conectar redes de impulsos neuronales y probarlos en distintos robots simulados con los que cuenta la plataforma. Se pueden ejecutar experimentos en paralelo porque tienen grupos de computadoras de alto rendimiento.

Conclusiones

La neurorrobótica es un campo de investigación activo en el que interactúan la robótica, la inteli-

gencia artificial y las neurociencias. Esta disciplina busca desarrollar modelos basados en el sistema nervioso central e implementarlos en agentes. La interacción de los agentes con el mundo alimenta al modelo para que se ajuste hasta lograr comportamientos análogos a los de los animales. Como hemos visto, hay aportaciones muy interesantes desde mediados del siglo xx que abarcan modelos neurológicos, plataformas de código abierto para su desarrollo y *hardware* neuromórfico. Estas herramientas no sólo tienen el potencial de ayudarnos a desarrollar agentes para que habiten ambientes complejos, sino para comprender mejor la interacción entre el cuerpo y el cerebro.

Alicia Montserrat Alvarado González

Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa.
aalvarado@cua.uam.mx

¹ Disponible en: <<https://neurobotics.net>>.
² Para más información: <<https://www.humanbrainproject.eu>>.

Lecturas recomendadas

- Alcalorpolítico.com (2013), “Destaca la conferencia ‘Robótica inteligente’, del investigador José Negrete”, sección Estado de Veracruz. Disponible en: <https://www.alcalorpolitico.com/informacion/destaca-la-conferencia-robotica-inteligente-del-investigador-jose-negrete-113964.html>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Davies, M., A. Wild, G. Orchard, Y. Sandamirskaya, G. A. Fonseca Guerra *et al.* (2021), “Advancing neuromorphic computing with Loihi: A survey of results and outlook”, *Proceedings of the IEEE*, 109(5):911-934. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9395703>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Floreano, D. y L. Keller (2010), “Evolution of adaptive behaviour in robots by means of Darwinian selection”, *PLoS Biology*, 8(1):e1000292. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000292>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Lara, B., W. Gaona, E. Escobar, J. M. Pardo y J. Hermosillo-Valadez (2021), “Development of body-based spatial knowledge through mental imagery in an artificial agent”, *Adaptive Behavior*, 29(4):349-368. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/1059712319895604>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Negrete-Martínez, J., R. Cruz-Estrada y S. Negrete-Yankelevich (2016), “Functional modularization of a Neurocranium: a robotic brain for a robotic body”, *eNeurobiología*, 7(15). Disponible en: <https://www.uv.mx/eneurobiologia/vols/2016/15/Negrete/HTML.html>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Pearson, M. J., B. Mitchinson, J. C. Sullivan, A. G. Pipe y T. J. Prescott (2011), “Biomimetic vibrissal sensing for robots”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 366:3085-3096. Disponible en: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2011.0164>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Rostro González, H. (2017), “Ingeniería Neuromórfica: El futuro de la computación”, *Milenio*, sección Opinión. Disponible en: <https://www.milenio.com/opinion/varios-autores/ug-tu-conecte-con-la-ciencia/ingenieria-neuromorfica-el-futuro-de-la-computacion>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Sandamirskaya, Y., M. Kaboli, J. Conradt y T. Celikel (2022), “Neuromorphic computing hardware and neural architectures for robotics”, *Science Robotics*, 7(67):eabl8419. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abl8419>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Torres Huitzil, C. (2014), “Ingeniería inversa del cerebro. De la inspiración biológica a sistemas de visión, en un chip”, *Ciencia y Desarrollo* [en línea]. Disponible en: <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/273/articulos/ingenieria-inversa-del-cerebro.html>, consultado el 12 de enero de 2025.
- Villaseñor, C. (2024), “Ingenieros mexicanos ayudan a construir el sistema neuromórfico más grande del mundo”, *Cio / Ediworld* [en línea]. Disponible en: <https://iworld.com.mx/ingenieros-mexicanos-ayudan-a-construir-el-sistema-neuromorfico-mas-grande-del-mundo/>, consultado el 12 de enero de 2025.



Robots de asistencia social para personas con demencia

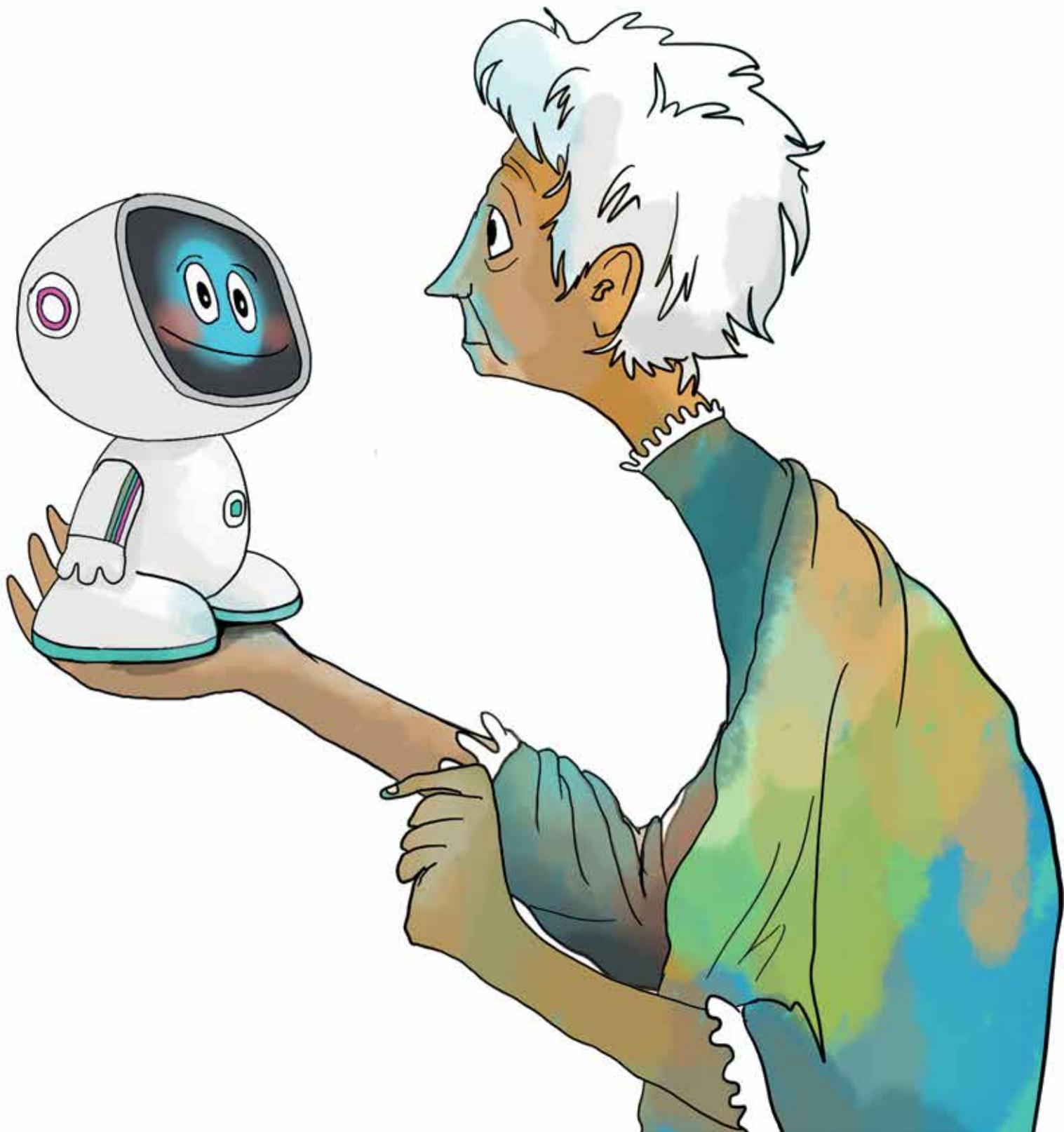
La inteligencia artificial centrada en el humano (HCAI, por sus siglas en inglés) se enfoca en priorizar el bienestar humano y tomar en cuenta consideraciones éticas en el desarrollo y uso de tecnologías basadas en inteligencia artificial (IA). Los robots de asistencia social, que tienen como propósito interactuar y asistir a personas, son un área de interés de la HCAI. Presentamos la plataforma robótica Eva, diseñada y desarrollada bajo el enfoque HCAI, dirigida a personas con demencia y a sus cuidadores para ofrecer características funcionales y escenarios de uso de un robot capaz de entablar una conversación, mostrar empatía y adaptarse al comportamiento del usuario.

La demencia y los robots de asistencia social

La demencia es un síndrome neurodegenerativo caracterizado por un deterioro progresivo de las funciones cognitivas, que interfiere con la capacidad del individuo para realizar sus actividades diarias. Este trastorno se manifiesta principalmente a través de la pérdida de memoria, alteraciones en el lenguaje, dificultades en la orientación espacio-temporal y deterioro del juicio y el razonamiento. La edad es el principal factor de riesgo de demencia, lo que representa un desafío cada vez mayor para la sociedad, ya que las personas afectadas requieren cuidados especializados y sus familias enfrentan una carga significativa.

El tipo más común de demencia es la enfermedad de Alzheimer, la cual representa alrededor del 70% de los casos. La enfermedad de Alzheimer es progresiva y no tiene cura conocida. Se estima que 9 de cada 10 personas que la padecen exhiben comportamientos y síntomas psicológicos como ansiedad, deambulación y trastornos de sueño que deterioran su calidad de vida y su relación con terceros, lo que propicia su aislamiento social. Los tratamientos farmacológicos y no farmacológicos para la demencia se enfocan principalmente en atender estos síntomas.

Intervenciones basadas en tecnologías han sido propuestas para mitigar los síntomas de la demencia. Entre éstas, el uso de robots de asistencia social (RAS), potenciados por los avances de la IA, resulta particularmente promisorio. El desarrollo



de los RAS se apoya en tres de los principales campos de la IA desde sus inicios: el control automático de robots, el procesamiento y entendimiento del lenguaje natural y el reconocimiento de patrones.

Los recientes avances en técnicas de aprendizaje profundo han permitido generar avances importantes en estos campos y por consiguiente en el desarrollo de los RAS. Estas técnicas le permiten a un robot reconocer la voz del usuario para convertirla en texto, comprender su significado e intenciones mediante procesamiento del lenguaje natural y generar comportamientos verbales y no verbales sintetizados por el robot. Además, las técnicas de reconocimiento de patrones le permiten al RAS detectar la presencia del usuario y reconocer actividades relevantes como el contacto visual. La integración de múltiples fuentes de datos como audio, video y señales fisiológicas permiten inferir si el usuario se muestra animado o ansioso. Así, el robot puede adaptar su comportamiento de una forma más natural y empática, incluyendo el uso de comunicación verbal (p. ej., diálogos, tono de voz) y no verbal (p. ej., expresiones faciales, movimientos, animaciones de luces).

Los RAS utilizan estrategias de interacción social para proporcionar asistencia de acuerdo con un contexto de cuidado de salud específico. Se han diseñado RAS para ser usados en diversos contextos, como el cuidado de adultos mayores y en terapias para niños con autismo. Pueden realizar tareas como recordar medicaciones, estimular la actividad cognitiva, ofrecer compañía y facilitar la comunicación con cuidadores.

El desarrollo y uso de los RAS se apoya en el campo de la inteligencia artificial centrada en el humano (HCAI), área que ha surgido del creciente reconocimiento de que el diseño de sistemas inteligentes debe priorizar las necesidades y valores humanos. Este enfoque es particularmente importante para desarrollar soluciones de IA para poblaciones vulnerables, como las personas con demencia y sus cuidadores informales. La HCAI integra múltiples perspectivas. En primer lugar, una perspectiva de diseño centrada en el usuario que asegura que los sistemas inteligentes estén adaptados a las necesidades, intereses y el contexto de los usuarios finales. En segundo lugar, la HCAI fomenta la colaboración sinérgica entre humanos

y agentes inteligentes, garantizando su supervisión y control por parte del humano. Finalmente, la HCAI enfatiza el abordaje de preocupaciones éticas como la privacidad, la equidad y la inclusividad. En aplicaciones que involucran robots en dominios como el cuidado de personas con demencia, esta asociación simbiótica toma un papel central. En este contexto, la HCAI puede facilitar una interacción más natural entre la persona con demencia y el robot, y empoderar a los cuidadores potenciando sus capacidades en lugar de reemplazarlos.

En las siguientes secciones describimos el diseño, desarrollo y evaluación de un robot de asistencia social creado en el CICESE para asistir a personas con demencia y sus cuidadores (Cruz-Sandoval, 2020), desde cada una de estas perspectivas de HCAI.

■ Diseño del robot de asistencia social Eva

■ Desde su concepción, el robot Eva (Embodied Voice Assistant) fue diseñado siguiendo una metodología centrada en el usuario. El primer prototipo de Eva se apoyó en sesiones de codiseño en las que participaron cuidadores de personas con demencia que trabajan en una residencia geriátrica, quienes interactuaron con Eva y propusieron características deseables y posibles escenarios de aplicación, tales como musicoterapia y conversaciones personalizadas para reducir la ansiedad. Siguiendo un proceso iterativo, el diseño físico y funcional del robot se fue adaptando para facilitar su adopción, funcionar de manera autónoma con un mínimo de problemas de comunicación y personalizar las intervenciones a cada paciente con demencia que participó en el proceso. Para ello se utiliza una **ontología de conceptos** asociados al usuario. Primero en lo referente al contenido, como tópicos de conversación, gustos musicales e historia de vida del usuario. Además, incluye metainformación para agilizar la interacción, la cual incluye, por ejemplo, tiempos de respuesta y patrones de respuesta del usuario. La ontología se actualiza conforme el robot aprende más del usuario a partir de las interacciones. Las ontologías han mostrado ser una herramienta útil en la inteligencia artificial para el procesamiento de lenguaje.

Ontología de conceptos

Representación del conocimiento con base en una jerarquía de conceptos y sus relaciones.

El resultado del proceso de diseño iterativo es la plataforma robótica abierta Eva¹ (véase la **Figura 1**). El sistema se ejecuta en una computadora de bajo costo e incluye los siguientes componentes: 1) pantalla sensible al tacto de 5 pulgadas donde se despliegan animaciones y expresiones faciales; 2) arreglo de micrófonos y LEDs que permiten distinguir la orientación de la fuente de voz y hacer animaciones para indicar el estado del robot (escuchando, hablando, etc.) y su estado anímico; 3) servomotores para mover la cabeza con dos grados de libertad; 4) cámara de rango para tareas que involucran visión por computadora, como el reconocimiento de la presencia del usuario. Una versión extendida incluye una base móvil que le permite al robot hacer movimientos corporales que le dan mayor capacidad expresiva. El robot ha sido replicado en universidades de Brasil, España y Suiza, en versiones que le han hecho mejoras y adaptaciones a otros escenarios.

El robot cuenta con una arquitectura de *software* flexible que facilita la incorporación de nuevos servicios y sensores. Esta flexibilidad se ve potenciada por los recientes avances en IA, especialmente en el desarrollo de modelos de aprendizaje automático preentrenados. Estos modelos, altamente versátiles, pueden ser adaptados con facilidad a diversas tareas, como el reconocimiento de actividades específicas (por ejemplo, comportamientos disruptivos durante la comida). Además, pueden ser encapsulados en componentes reutilizables, siguiendo el paradigma de la inteligencia artificial como servicio (AIaaS). Éstos son algunos de los principales servicios inteligentes de Eva:

- El procesamiento y reconocimiento de voz se realiza localmente para proteger la privacidad; además, se puede seleccionar la voz con la que habla el robot de entre varias alternativas disponibles.
- Mantiene conversaciones personalizadas con base en perfiles del usuario, que incluyen información como sus gustos e historia personal. El robot aprende cómo interactuar mejor con cada persona incorporando información de interac-

¹ Para más información, puede consultarse el sitio de la plataforma en: <https://eva-social-robot.github.io/>.



Figura 1. Robot de asistencia social Eva en un escenario de asistencia durante la alimentación.

ciones previas sobre sus preferencias y **crónemica interactiva** (longitud de enunciados, tiempo para responder, velocidad de habla, etcétera).

- Reconoce lo que hace el usuario, como levantarse en la noche o arrojar comida, para adaptar su comportamiento. Esto lo hace a partir de información recabada de sensores internos, como la cámara en el robot, o externos, como los inerciales en el reloj inteligente del usuario.
- Entiende gestos y emociones, como dirección de la mirada y síntomas de ansiedad, observando al usuario y analizando sus señales fisiológicas para hacer más natural la interacción.
- Puede implementar estrategias de conversación para escenarios específicos, como terapias personalizadas de reminiscencia o de estimulación cognitiva, con el uso de plantillas de **prompts** y grandes modelos de lenguaje, como ChatGPT.
- Tiene componentes para funciones específicas, como juegos de estimulación cognitiva y guías para rutinas de ejercicios.

Cronémica interactiva

Estudia el uso del tiempo en la comunicación no verbal; por ejemplo, el uso de pausas al hablar le permite al interlocutor intervenir en una conversación.

Prompts

Son instrucciones, preguntas o entradas que se le hacen a un sistema de inteligencia artificial para obtener una respuesta.

Otro ejemplo de codiseño del RAS fue la colaboración con una médica geriatra para implementar pruebas de demencia basadas en interacción verbal. Las voces de adultos mayores recopiladas permitieron entrenar modelos de aprendizaje automático como apoyo en el diagnóstico temprano de demencia (Cabrera, 2022). En otro escenario, se utilizó

Actividades ancla

Aquellas que la persona asocia con la realización de otra actividad; por ejemplo, lavarse los dientes antes de dormir o tomar un medicamento después de desayunar.

aprendizaje automático para reconocer **actividades ancla** asociadas a la medicación que generan un comportamiento proactivo de un asistente conversacional de voz (Rodríguez y cols., 2021).

Interacción y colaboración humano-robot

El robot Eva ha sido utilizado en intervenciones terapéuticas orientadas a estimular cognitivamente a personas con demencia y disminuir la frecuencia e intensidad de síntomas y comportamientos disruptivos asociados a la demencia. En un estudio formativo de 16 semanas, 12 adultos mayores con demencia interactuaron con el robot en sesiones grupales con duración aproximada de 30 minutos. Este estudio permitió establecer el tipo de interacción verbal que propicia la participación activa de las personas con demencia. Se incorporaron estrategias de conversación recomendadas por organizaciones como la Alzheimer's Association, tales como hablar con frases simples, dar tiempo para responder y usar el humor. Los resultados del estudio resaltan la importancia de personalizar los diálogos del robot a cada participante (Cruz-Sandoval y cols., 2019) e informaron la automatización del robot para guiar las terapias sin asistencia de un operador.

Para valorar el impacto del RAS, se diseñó una terapia de estimulación cognitiva con una duración de 14 sesiones y la participación de 10 adultos mayores con demencia que fue guiada por el robot Eva de forma completamente autónoma. La terapia fue exitosa en reducir la frecuencia e intensidad de comportamientos y síntomas psicológicos de la demencia (Cruz-Sandoval y cols., 2020). Los cuidadores reportaron un incremento en la socialización, mejora en el estado de ánimo y en autonomía para realizar actividades de la vida diaria. Se utilizaron relojes inteligentes para medir a lo largo de la intervención ritmo cardíaco, actividad y sueño. La mayoría de los participantes incrementaron el tiempo de sueño

nocturno y disminuyeron el sueño diurno en los días de la intervención (Favela y cols., 2020).

Consideraciones éticas

El uso de RAS en terapias no farmacológicas para la demencia no está exento de riesgos y consideraciones éticas que deben analizarse y discutirse, como sucede con todo tipo de intervenciones en salud donde rige el principio hipocrático “Primero, no causar daño”.

El uso de un RAS como apoyo para gestionar síntomas como la ansiedad y la depresión presenta similitudes con la terapia con muñecas. Ambas intervenciones buscan reducir el malestar emocional y mejorar el estado de ánimo. Sin embargo, una crítica común a estas terapias radica en el potencial de que el paciente confunda al objeto con una persona real, lo que podría generar confusión, desorientación y una dependencia emocional que intensifique

la ansiedad. Es necesario evaluar de manera integral los riesgos que implican estas intervenciones frente a sus beneficios en la mejora de la calidad de vida de personas con demencia y la reducción en la carga asistencial de sus cuidadores.

Una crítica común al uso de RAS en personas con demencia es que pueden fomentar su aislamiento social al priorizar la interacción con el robot. Sin embargo, las terapias con Eva han demostrado que, cuando se implementan en terapias grupales, contribuyen a estimular la socialización y el vínculo entre pares, incluso horas después de terminada la sesión. Un RAS

puede tener un papel más activo en la socialización guiando, por ejemplo, terapias de reminiscencia que promueven la conversación sobre experiencias pasadas y así fortalecer los vínculos afectivos entre familiares.

La interacción frecuente con un RAS posibilita un monitoreo continuo del usuario que permita evaluar la eficacia de las terapias y la progresión de la



demencia (Favela y cols., 2020). Sin embargo, esta capacidad de recopilar datos personales plantea riesgos para la privacidad del individuo, como la posibilidad de discriminación o el uso indebido de la información. Es importante establecer marcos regulatorios que garanticen la protección de los datos particulares de las personas con demencia y consideren las perspectivas de sus cuidadores y de otros actores relevantes, como profesionales de la salud.

Los modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM, según siglas del inglés: Large Language Model) ofrecen una oportunidad prometedora para mejorar las interacciones de los RAS en el cuidado de personas con demencia. Sin embargo, estos modelos pueden generar conversaciones condescendientes, percibidas como paternalistas, o crear dependencias emocionales no deseadas entre el robot y el paciente, por lo que es crucial realizar más investigación en la personalización y adaptación de los LLM para este contexto específico, y el desarrollo de instrucciones (*prompts*) adecuadas. Esto permitirá crear interacciones más efectivas y apropiadas entre los RAS y las personas con demencia, equilibrando la asistencia tecnológica con la sensibilidad humana necesaria en el cuidado de la salud.

■ Conclusiones

■ Si bien los avances en IA prometen revolucionar la asistencia a personas con demencia, también plantean desafíos éticos y sociales. Es fundamental desarrollar tecnologías centradas en el ser humano que prioricen el bienestar y la dignidad de las personas con demencia y sus cuidadores, así como la formación de profesionales capacitados para desarrollar y utilizar estas herramientas de manera responsable y efectiva.

En última instancia, el uso de un RAS como intervención no farmacológica para la demencia debe guiarse por un fuerte sentido de responsabilidad social que asegure que estas tecnologías se utilicen de manera ética y beneficiosa para las personas con demencia y sus comunidades.

Jesús Favela Vara

Departamento de Ciencias de la Computación, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

favela@cicese.mx

Dagoberto Cruz Sandoval

Healthcare Robotics Lab, University of California, San Diego.

dcruzandoval@ucsd.edu

Lecturas recomendadas

Cabrera, L. (2022), "Recolección y análisis de voz en adultos mayores para el diagnóstico de demencia", tesis de maestría en Ciencias de la Computación, CICESE. Disponible en: <https://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=26204>, consultado el 21 de enero de 2025.

Cruz-Sandoval, D. y J. Favela, J. (2019), "Incorporating conversational strategies in a social robot to interact with people with dementia", *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 47:140-148. Disponible en: <https://doi.org/10.1159/000497801>, consultado el 21 de enero de 2025.

Cruz-Sandoval, D. (2020), "Robot conversacional como apoyo a intervenciones no farmacológicas para adultos mayores con demencia", tesis de doctorado en Ciencias de la Computación, CICESE. Disponible en: <https://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=25698>, consultado el 21 de enero de 2025.

Cruz-Sandoval, D., A. Morales-Téllez, E. B. Sandoval y J. Favela (2020), "A social robot as therapy facilitator in interventions to deal with dementia-related behavioral symptoms", *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 161-169.

Favela, J., D. Cruz-Sandoval, A. Morales-Téllez e I. H. López-Nava (2020), "Monitoring behavioral symptoms of dementia using activity trackers", *Journal of Biomedical Informatics*, 109:103520. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2020.103520>, consultado el 21 de enero de 2025.

Rodríguez, M. D. et al. (2021), "Assisting older adults with medication reminders through an audio-based activity recognition system", *Personal and Ubiquitous Computing*, 25(2):337-351. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01420-4>, consultado el 21 de enero de 2025.

Elizabeth López Lozada, Juan Humberto Sossa Azuela y Elsa Rubio Espino



Detección inteligente de caídas para el cuidado de los adultos mayores

Las caídas son accidentes que frecuentemente les ocurren a los adultos mayores y representan la segunda causa de muerte a nivel mundial de este grupo de edad. Su detección es importante para brindar asistencia a los afectados de forma oportuna. Por ello, en este artículo se describe un sistema de video que detecta las caídas de forma automática mediante el uso de inteligencia artificial con una efectividad del 99 por ciento.

Introducción

Las caídas son incidentes no intencionados que provocan la pérdida de equilibrio, provocando que una persona termine en el suelo o en otra superficie firme que la detenga. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), México se encuentra en el segundo lugar de América en cuanto a caídas de personas mayores. En 2019, el 10% de los fallecimientos de adultos mayores en México se debió a una caída. Además, el Centro Nacional de Programas Preventivos y Control de Enfermedades reporta que en México el 65% de los adultos mayores experimentan caídas dentro de sus hogares.

Las caídas generan secuelas físicas y psicológicas en la vida de los adultos mayores, provocando un aumento en el miedo, la ansiedad y la depresión. Esto conduce a una disminución en su actividad diaria, lo que resulta en un equilibrio inadecuado durante la marcha y un debilitamiento muscular que afecta su movilidad e independencia. Por ello, es importante evitar y detectar estos eventos de emergencia para una intervención oportuna y mejorar la calidad de vida de los adultos mayores.

Por tanto, es importante el desarrollo de tecnologías que permitan asistir, prevenir, detectar y notificar de forma oportuna tanto a familiares como profesionales de la salud cuando se presentan accidentes que representen un riesgo para su salud (véase la [Figura 1](#)).





Figura 1. Los sistemas de detección de caídas permiten notificar a los familiares sobre el accidente y esto ayuda a que los adultos mayores reciban atención oportuna. Ilustración: Elizabeth López Lozada.

El papel de la inteligencia artificial para la detección de caídas

En el ámbito de la salud, la inteligencia artificial (IA) se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo de tecnologías. Éstas abarcan desde la asistencia y el cuidado de la salud de las personas, la gestión de medicamentos y el análisis de imágenes médicas, hasta la detección y prevención de caídas y accidentes, entre otras aplicaciones.

La IA les permite a los sistemas de monitoreo incorporar algoritmos para la detección, reconocimiento y predicción de caídas de manera autónoma. Esto significa que no es necesario que una persona intervenga para identificar la caída y enviar la notificación del evento.

Muchos de los enfoques de IA utilizan redes neuronales artificiales. Éstas son modelos de aprendizaje automático diseñados para tomar decisiones de manera similar al cerebro humano. Su funcionamiento se basa en el uso de datos de entrenamiento para aprender y mejorar su precisión con el tiempo.

En el ámbito de la detección de caídas, el objetivo es enseñarle a la computadora a identificar cuándo un evento corresponde a una caída. Para lograr esto, se utiliza un conjunto de datos compuesto por información que representa caídas y otros eventos que no lo son, cada uno identificado con una etiqueta correspondiente. Estos modelos se entrenan hasta alcanzar una alta precisión, lo que significa que la computadora puede identificar correctamente cuándo un video muestra una caída, minimizando la cantidad de errores.

Tecnologías para la detección de caídas

Las tecnologías para la detección de caídas pueden contar con una amplia gama de sensores, como acelerómetros y giroscopios colocados en dispositivos portátiles, o con cámaras de vigilancia dentro del hogar que permitan realizar el seguimiento de las actividades de las personas. Las principales ventajas y desventajas se muestran en la **Tabla 1**.

Como se observa en esa tabla, los acelerómetros y giroscopios, que son pequeños y ligeros, ofrecen una opción económica y fácil de integrar en dispositivos portátiles. Sin embargo, estos sensores requieren que el usuario los lleve puestos. Entonces, si una persona olvida usar los sensores, no se podrá detectar la

Tabla 1. Descripción de los tipos de sensores para la detección de caídas y sus principales ventajas y desventajas.

Tipo de sensor	¿Qué hace?	Ventajas	Desventajas
Acelerómetros	Miden cómo se mueve el cuerpo y pueden detectar cuando hay cambios bruscos en la velocidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños y ligeros. • Fáciles de usar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se llevan puestos. • Pueden dar falsas alarmas.
Giroscopios	Miden la orientación del cuerpo y ayudan a detectar caídas al notar cambios en la inclinación.	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños y ligeros. • Muy precisos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debes llevarlos puestos. • Pueden dar falsas alarmas.
Cámaras	Vigilan la casa y detectan caídas mirando las actividades en video.	<ul style="list-style-type: none"> • No necesitas llevar nada puesto. • Monitorean todo el tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden invadir la privacidad. • Sólo funcionan donde hay cámaras.

caída. Las personas pueden olvidar fácilmente ponerse estos dispositivos y, además, pueden sentirse incómodas teniendo que usar o vestir dispositivos adicionales.

Por otro lado, los sistemas basados en cámaras de video proporcionan un monitoreo continuo sin necesidad de que el usuario lleve o vista dispositivos especiales, como se muestra en la **Figura 2**. Una desventaja significativa de estos sistemas es la potencial invasión de la privacidad debido al uso de cámaras. Sin embargo, a diferencia de los acelerómetros, las cámaras no requieren que el usuario las lleve puestas y pueden ofrecer datos más completos para el análisis, lo que permite una detección más precisa y detallada de caídas.



Figura 2. Escenario propuesto para la implementación del prototipo. Ilustración: Elizabeth López Lozada.

Desarrollo de tecnologías para la detección de caídas en México

En México, en el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (CIC-IPN) se desarrolla un prototipo para la detección de caídas usando videos. El sistema propuesto en la **Figura 3** consiste en una etapa de procesamiento del video, la extracción de características y la detección de la caída.

Para el desarrollo de esta propuesta se utilizó el lenguaje de programación de Python junto con Ten-

sorFlow. El procesamiento de video, como se muestra en la **Figura 4**, consiste en identificar a las personas en el video y recortar el área donde sólo aparece la persona detectada. Para ello, utilizamos un método de seguimiento de personas llamado FairMOT e implementamos un programa que recorta el área en la que aparece la persona y ajusta el tamaño de los cuadros de video a 224×224 píxeles.

A continuación, se extraen las características de cada cuadro de video utilizando las capas del modelo preentrenado MoviNet, que es el que usamos

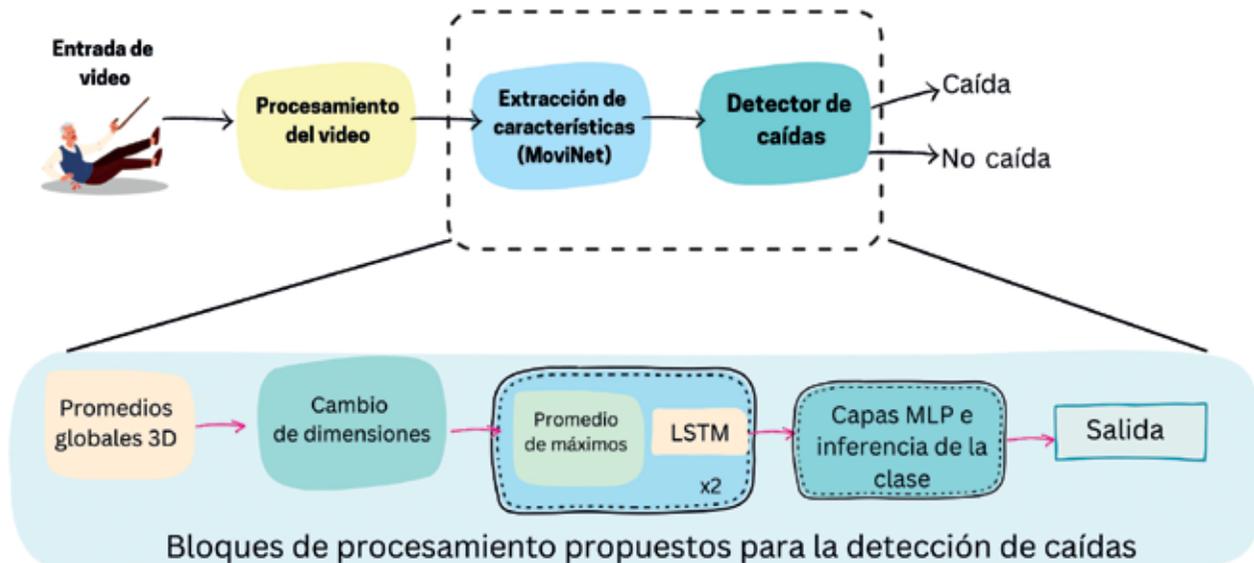


Figura 3. Representación general del sistema de detección de caídas. Ilustración: Elizabeth López Lozada.

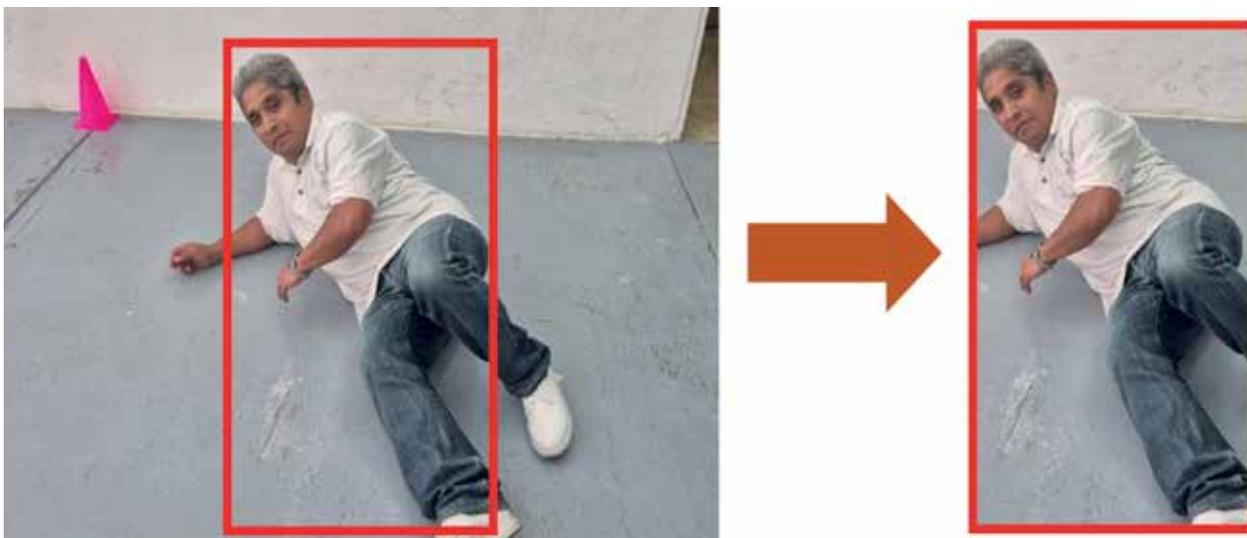


Figura 4. Procesamiento del cuadro de video con el seguimiento de personas y el recorte del cuadro de video. Foto: Elizabeth López Lozada.

Redes neuronales convolucionales 3D

Son un tipo de algoritmo de aprendizaje profundo diseñado para analizar datos tridimensionales, como imágenes volumétricas o videos.

en esta ocasión. Este modelo, compuesto por **redes neuronales convolucionales 3D**, permite procesar videos en tiempo real sin requerir mucha memoria. Además, es ideal para dispositivos con bajos recursos, como teléfonos celulares. Por ello, consideramos que este modelo es una herramienta valiosa para desarrollar tecnologías destinadas al cuidado de los adultos mayores.

Redes neuronales recurrentes (RNR)

Son un tipo de algoritmo de aprendizaje profundo diseñado para procesar secuencias de datos, como texto, audio o series temporales. A diferencia de las redes neuronales convolucionales, las RNR cuentan con conexiones que forman ciclos, lo que les permite mantener un estado interno y recordar información de pasos anteriores en la secuencia.

Finalmente, se propuso un enfoque para la detección de caídas que utiliza las capas que se muestran en el bloque inferior de la **Figura 3**. Este enfoque utiliza varias capas de procesamiento, comenzando con un proceso de promedios globales (*global average pooling*, en inglés) para simplificar los mapas de características y resaltar las partes más importantes de los cuadros de video. A continuación, se ajustan las dimensiones de los vectores de características.

Luego, se emplea un grupo de capas que incluyen un proceso de promedios máximos (*max pooling*, en inglés) y **redes neuronales recurrentes** (RNR o LSTM). Estas capas ayudan a aprovechar las características temporales del video para detectar caídas. Finalmente, se utilizan capas densas que reducen las características y producen una salida que indica si hubo una caída o no.

Para los experimentos, seleccionamos 1 386 videos de los conjuntos de datos NTU RGB+D 60 y CAUCAFall para entrenar al modelo. Este conjunto

de datos se dividió en un conjunto de entrenamiento que contiene el 80% de los datos y un conjunto de validación con el 20% restante. Los videos seleccionados se caracterizan por mostrar escenas de personas que sufren una caída y escenas en las que ocurre alguna otra acción. Del total de videos, 893 presentan escenas de caídas y 523 muestran otras actividades.

Estos videos muestran escenas en interiores bien iluminados, en las que sólo aparece una persona cuyo cuerpo completo es siempre visible y sin obstrucciones. Las acciones se capturaron desde tres ángulos: frontal (0°), inferior (45°) y superior (45°), como se muestra en la **Figura 5**.

Para finalizar, se usaron los videos seleccionados para enseñarle al modelo a detectar caídas. Este proceso, conocido como “época”, consiste en mostrarle al modelo los videos para que ajuste sus parámetros basándose en ellos. Este proceso se repite muchas veces hasta que el modelo comete la menor cantidad de errores y se vuelve más preciso.

Entrenamos al modelo propuesto en este trabajo durante 10 épocas. Se utilizó un optimizador llamado Adam, que es el algoritmo que ajusta los parámetros del modelo para mejorar su rendimiento. Además, se usó una función de pérdida llamada Sparse Categorical Crossentropy, que mide cuán lejos están los resultados del modelo de los resultados reales. Como

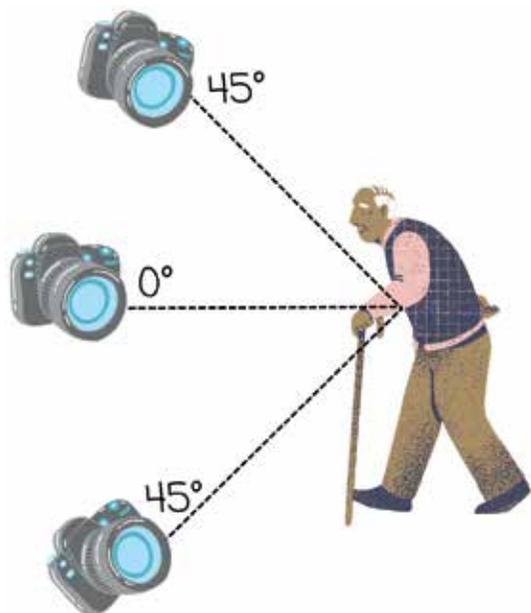


Figura 5. Posición de las cámaras para tomar las muestras de video. Ilustración: Elizabeth López Lozada.

resultado, el modelo alcanzó una precisión del 99 % en la detección de caídas. Esto significa que, de 100 casos, el sistema detectará 99 correctamente.

■ Implementación del detector de caídas

■ Para la primera implementación del detector de caídas, se decidió utilizar una cámara de video conectada a una computadora. La cámara se coloca en una habitación a la altura de un metro y medio, apuntando directamente hacia el área que se quiere observar. Las pruebas de detección de caídas se realizaron a una distancia de entre dos y tres metros de la cámara. En esta etapa inicial, se aseguraron condiciones de buena iluminación, es decir, con la habitación bien iluminada.

Esta configuración es sencilla y directa, ya que sólo requiere una cámara y una computadora. Además, las condiciones de buena iluminación aseguran que las imágenes capturadas sean claras, lo que mejora la precisión en la detección de caídas.

Uno de los principales inconvenientes es la dependencia de una buena iluminación, que puede no estar disponible en todas las situaciones. Además, la posición fija de la cámara y la distancia limitada a dos metros pueden afectar la eficacia del sistema.

Para mejorar este sistema, sería beneficioso desarrollar algoritmos que funcionen bien en diversas condiciones de iluminación, incluidos entornos con poca luz. Además, utilizar múltiples cámaras o cámaras con ángulos ajustables permitiría cubrir áreas más grandes y distancias variables.

■ Retos y oportunidades

■ Un sistema de detección de caídas basado en video presenta varios retos y oportunidades. Uno de los principales retos es la privacidad, ya que, al instalar cámaras en un hogar, los habitantes pueden sentir que su privacidad y seguridad están siendo comprometidas. Para abordar esto, sería crucial implementar técnicas que protejan la privacidad del usuario, como la anonimización de las imágenes, para mejorar la aceptación del sistema por parte de los usuarios.

Además, la efectividad del sistema puede verse comprometida por las condiciones de iluminación. En ambientes con poca luz, la precisión de la detección podría disminuir y, por otro lado, puede ser problemática la obstrucción de la imagen por objetos que bloqueen la visibilidad de las personas en el video. Para mitigar estos desafíos, se pueden tomar varias medidas. Por ejemplo, se pueden colocar las cámaras en lugares estratégicos donde es menos pro-



bable que los objetos bloqueen la vista, e implementar algoritmos que detecten y manejen obstrucciones en tiempo real.

La integración con otras tecnologías, como sensores adicionales (acelerómetros y giroscopios), puede complementar y mejorar la detección de caídas. Además, las microcomputadoras, como la Raspberry Pi 5, ofrecen ventajas como el ser más económicas que las computadoras de escritorio, la facilidad de conexión a redes para enviar notificaciones, portabilidad, discreción y menor consumo de energía. Por ello, consideramos que la siguiente etapa del trabajo será la implementación del modelo propuesto en una Raspberry Pi 5 y poner a prueba el desempeño del prototipo.

Consideramos que, comparada con sistemas que utilizan sensores, la detección por video no depende de que el usuario lleve dispositivos consigo, lo que es una gran ventaja. No obstante, en lugares como el baño, colocar una cámara puede no ser adecuado,

por lo que desarrollar sistemas integrales que combinen información de dispositivos móviles y cámaras podría ser la solución más completa.

Conclusión

Se presentó una propuesta para la detección automática de caídas mediante inteligencia artificial. Se desarrolló un modelo basado en redes neuronales artificiales que alcanzó una precisión del 99 % al utilizar el modelo MoviNet. Para aumentar la robustez y aplicabilidad de nuestro sistema, en trabajos futuros incorporaremos videos con mayores variaciones en iluminación, ángulos de cámara y posibles obstrucciones, a fin de evaluar el desempeño del modelo en condiciones más realistas. Además, seguiremos perfeccionando el sistema para asegurar su eficacia en escenarios reales, lo que implicará la integración de datos variados y la adaptación del modelo a estos nuevos contextos.



■ Consideraciones adicionales

■ Con el aumento de la población de adultos mayores, es de suma importancia desarrollar tecnologías para mejorar su salud y calidad de vida. La IA puede crear modelos que detecten caídas automáticamente e integrarlos en dispositivos de asistencia. Es esencial que los gobiernos inviertan en estas tecnologías para beneficiar a los adultos mayores.

Los autores agradecen a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México, a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo económico brindado para la realización de esta investigación.

Elizabeth López Lozada

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación.
elopezl2020@cic.ipn.mx

Juan Humberto Sossa Azuela

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación.
hsossa@cic.ipn.mx

Elsa Rubio Espino

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación.
erubio@cic.ipn.mx

Lecturas recomendadas

Nagusi Intelligence Center (s. f.), *Inteligencia artificial para las personas mayores: Aplicaciones y oportunidades de negocio*, Barcelona, Nagusi Intelligence Center. Disponible en: <https://www.bizkaia.eus/documents/9027320/11569571/%2307_Inteligencia+Artificial_VF-ES.pdf>, consultado el 21 de enero de 2025.

Organización Mundial de la Salud (octubre de 2024), “Envejecimiento y salud”, OMS [en línea], Centro de Prensa. Disponible en: <<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>>, consultado el 21 de enero de 2025.

Organización Panamericana de la Salud (s. f.), “Envejecimiento saludable: Datos y visualizaciones”, OPS [en línea]. Disponible en: <<https://www.paho.org/es/envejecimiento-saludable-datos-visualizaciones>>, consultado el 21 de enero de 2025.

Quinayás Burgos, C. A., D. F. Quintero Benavidez, E. Ruiz Omen y J. L. Narváez Semanate (2020), “Sistema de detección de caídas en personas utilizando video vigilancia”, *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 28(4):684-693. Disponible en: <<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000400684>>, consultado el 21 de enero de 2025.

TensorFlow (s. f.), *TensorFlow* [en línea]. Disponible en: <<https://www.tensorflow.org/?hl=es-419>>, consultado el 21 de enero de 2025.

Terra Jonas, L., K. Vitorelli Diniz Lima, M. Inácio Soares, M. A. Mendes, J. V. da Silva y P. M. Ribeiro (2014), “Evaluación del riesgo de caídas en las personas mayores: ¿cómo hacerlo?”, *Gerokomos*, 25(1):13-16. Disponible en: <<https://dx.doi.org/10.4321/S1134-928X2014000100004>>, consultado el 21 de enero de 2025.

Usmani, S., A. Saboor, M. Haris, M. A. Khan y H. Park (2021), “Latest research trends in fall detection and prevention using machine learning: A systematic review”, *Sensors*, 21(15):5134. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/s21155134>>, consultado el 21 de enero de 2025.

Ambientes inteligentes para apoyar el aprendizaje

Actualmente los estudiantes acceden a través de dispositivos móviles a múltiples recursos educativos, como cursos electrónicos, videos, juegos educativos, infografías o imágenes, entre muchos más. Usando técnicas de inteligencia artificial, los recursos educativos pueden personalizarse de acuerdo con las necesidades del estudiante, haciendo más eficiente el proceso de aprendizaje.

Introducción

¿Es posible que una computadora le pueda enseñar matemáticas o ciencia a un estudiante? Las computadoras se han utilizado en la educación desde hace más de 60 años; el surgimiento de internet y los avances en diversas áreas, como inteligencia artificial, interfaces humano-computadora, reconocimiento de patrones, etc., han permitido la creación y evolución de sistemas computacionales que atienden de forma personalizada a los estudiantes con el fin de lograr un mayor aprendizaje.

Los ambientes inteligentes de aprendizaje son sistemas computacionales que utilizan inteligencia artificial para proveerles actividades de aprendizaje a los usuarios. Estos sistemas guían el aprendizaje de los estudiantes considerando sus conocimientos sobre el tema y personalizan la instrucción de acuerdo con las necesidades de cada estudiante.

Además, en las últimas décadas los sistemas para el aprendizaje han incorporado diversos elementos como son el reconocimiento de emociones y personalidad, la **ludificación** (o gamificación), la realidad aumentada, realidad virtual o realidad extendida, con el fin de proveer ambientes más inmersivos donde los estudiantes se sientan comprometidos con su aprendizaje.

En este artículo se presentan algunos trabajos que fueron desarrollados para apoyar el aprendizaje en las áreas de matemáticas, química y tecnología.

Ludificación

Se refiere a las propiedades de un sistema interactivo que buscan incentivar e involucrar a los usuarios finales mediante el uso y la estructura de estímulos frecuentemente presentes en los videojuegos.



GIFT TREE

Photo taken • Add user • Download image

1001

Ambientes de aprendizaje

Un ambiente de aprendizaje (AA) se define como una estación física donde sucede el proceso de enseñanza y aprendizaje. Dado que los estudiantes pueden aprender en una gran diversidad de locaciones, el término se usa como una alternativa para el salón de clases, que tiene connotaciones más limitadas. El objetivo principal de un ambiente de aprendizaje es facilitar las diferentes actividades del aprendizaje. Los ambientes de aprendizaje en la computación se clasifican en diferentes tipos; por ejemplo, un sistema tutor inteligente (STI) actúa como un tutor humano guiando al estudiante durante el proceso de aprendizaje. Estos sistemas utilizan estrategias pedagógicas para ofrecerle ayuda al estudiante cuando comete algún error o no puede responder a una pregunta. Además, cuando un STI es multiplataforma se conoce como ambiente inteligente de aprendizaje (AIA). Cuando un ambiente inteligente de aprendizaje puede acceder a los estados afectivos del estudiante, se llama sistema tutor afectivo (STA) o ambiente de aprendizaje afectivo (AAA) (Zatarain y cols., 2023).

Los ambientes de aprendizaje afectivos, además de contar con modelos que corresponden a las variables cognitivas, también consideran variables afectivas, como la personalidad y las emociones, para agregar un nuevo nivel de complejidad a la personalización de las actividades.

En 2004 Graesser y cols. presentaron uno de los primeros AAA, llamado AutoTutor para el aprendiza-

je de física newtoniana, computación y pensamiento crítico. Éste se comunicaba con el usuario a través de diálogos en lenguaje natural y se centraba en tecnologías de aprendizaje y procesamiento del discurso. AutoTutor apareció con un agente animado que actúa como compañero de diálogo con el alumno. El agente animado ofrece los movimientos de diálogo de AutoTutor con voz, entonación, expresiones faciales y gestos sintetizados.

La **Figura 1** muestra una imagen de la interfaz de AutoTutor donde el agente afectivo explica el proceso de transmisión de mensajes usado en las redes de computadoras.

Computación afectiva en la educación

La computación afectiva es un área de la inteligencia artificial que estudia la influencia de las emociones en la computación y cómo las computadoras, para ser consideradas realmente inteligentes y así interactuar de una manera más natural con las personas, necesitan reconocer, entender e incluso expresar emociones.

En el campo de la educación, la computación afectiva es primordial porque además de los factores cognitivos y de memorización, los factores afectivos como las emociones, los sentimientos o la personalidad también tienen un papel relevante durante el proceso de aprendizaje de un estudiante.

La detección y reconocimiento del estado afectivo de un estudiante se puede realizar por una computadora en forma automática procesando diversas señales como las expresiones faciales (véase la **Figura 2**), voz, texto escrito, postura o señales fisiológicas, entre otras.

En la **Figura 3** se muestra a un usuario usando un ambiente afectivo de aprendizaje llamado JavaSensei (Zatarain-Cabada y cols., 2018), el cual fue desarrollado en el Laboratorio de Computación Afectiva del Instituto Tecnológico de Culiacán. JavaSensei es un ambiente de aprendizaje para programar código en lenguaje Java. Éste le presenta un problema al usuario solicitando que lo resuelva a través de un programa Java. Mientras el usuario resuelve el problema, el sistema JavaSensei utiliza una red neuronal

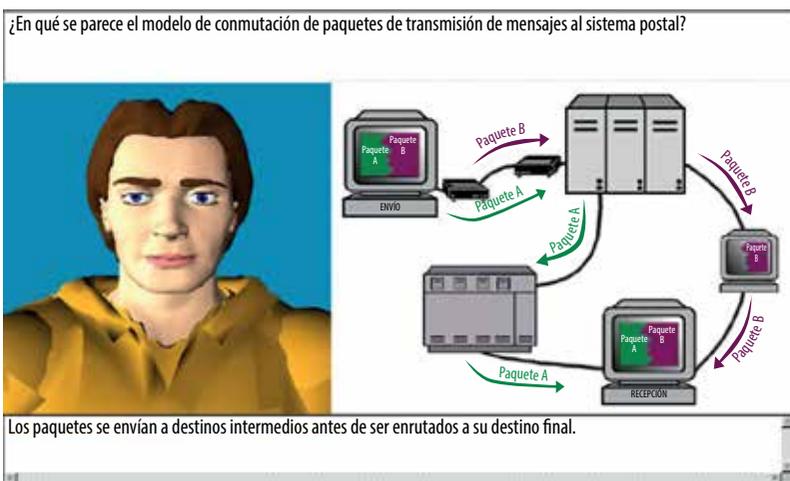


Figura 1. Interfaz de AutoTutor. Tomado de Graesser y cols., 2004.

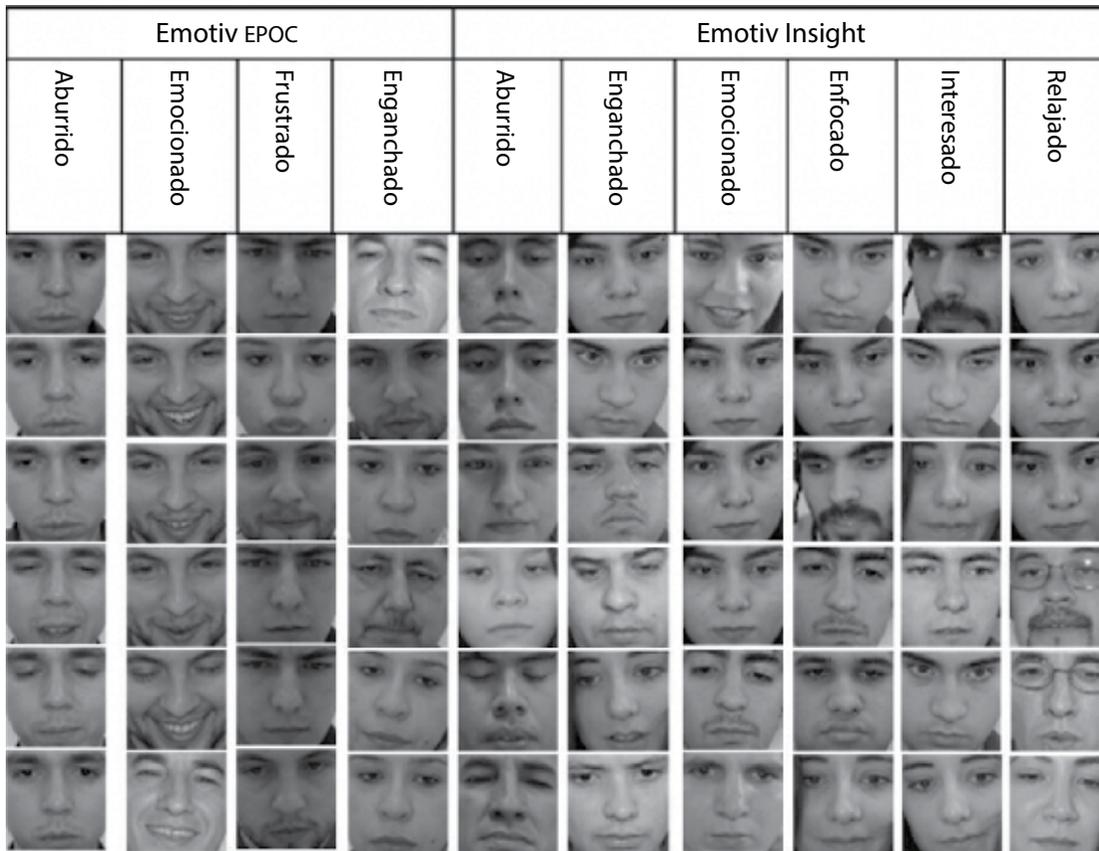


Figura 2. Diferentes expresiones faciales de usuarios durante el aprendizaje. Tomado de González-Hernández y cols., 2018.

artificial para realizar el reconocimiento de afecto usando las señales captadas desde una cámara web, un micrófono y una diadema Emotiv para señales encefalográficas. Con estos tres elementos afectivos (expresión facial, voz y señales del cerebro), además de otros elementos de tipo cognitivo, como los errores que el usuario comete al desarrollar un programa (proceso de codificación), o el tiempo que utiliza para resolver un problema, el ambiente afectivo de aprendizaje JavaSensei toma decisiones y adapta los contenidos del tutor de acuerdo con las necesidades del estudiante, considerando tanto los aspectos emocionales como cognitivos. Para implementar el manejo de la parte cognitiva (errores y tiempo), se utilizó un sistema experto difuso.

La realidad extendida (RX) en la educación

El concepto de RX engloba diferentes tecnologías bajo el espectro de la virtualización; es decir, el ni-

vel en el que lo real se integra con lo virtual. En un extremo de RX se encuentra la realidad aumentada (RA), que agrega información virtual sobre el mundo real; mientras que en el otro extremo está la realidad virtual (RV), donde un entorno virtual sustituye



Figura 3. Usuario de JavaSensei usando una diadema Emotiv. Foto del autor.



Figura 4. Aplicaciones de realidad aumentada y virtual. Imágenes tomadas de Cárdenas, 2023.

completamente al ambiente real. La Figura 4 presenta dos aplicaciones, una de realidad aumentada (izquierda) y otra de realidad virtual (derecha).

Las herramientas de aprendizaje *RX* basadas en la web le ofrecen al usuario final la capacidad de interactuar con el material didáctico a través de tecnologías informáticas espaciales e inmersivas. Las experiencias inmersivas buscan reducir los retos que se presentan durante la enseñanza, permitiendo mejorar la percepción sensorial del usuario, así como de la información que recibe, ya sea a través de técnicas de *RA* —donde los elementos virtuales se superponen

al mundo real y pueden interactuar dinámicamente en conjunto con un espacio físico—, o recreando un entorno totalmente virtual e inmersivo en la *RV* —donde los usuarios experimentan aislados de la realidad—.

Actualmente existe interés en integrar las tecnologías emergentes de *RX* en cursos y en material educativo dirigido a la educación de la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (*STEM*, por sus siglas en inglés). Estas tecnologías presentan un gran potencial para mejorar el aprendizaje con la inclusión de entornos educativos más interactivos e intuitivos en los planes de estudio.

ARGeo: ambiente de aprendizaje para geometría

ARGeo es una aplicación de realidad aumentada para el aprendizaje de temas de geometría, la cual fue desarrollada en el Laboratorio de Tecnologías Inteligentes para el Aprendizaje del Instituto Tecnológico de Culiacán (Zatarain y cols., 2019). ARGeo le ofrece al estudiante un conjunto de ejercicios sobre cálculo de área, volumen y cortes de diversos cuerpos geométricos (véase la Figura 5).



Figura 5. Interfaz principal de ARGeo y vista previa de ejercicios. Tomado de Zatarain y cols., 2019.



En el sistema ARGeo, la cámara es el componente principal del dispositivo móvil que tiene dos importantes funciones: capturar el rostro para detectar emociones y capturar marcadores para desplegar la realidad aumentada en la pantalla. Mientras el estudiante interactúa con la aplicación, ésta captura una imagen del rostro del estudiante y clasifica la emoción detectada mostrándola en pantalla. Para implementar la clasificación o reconocimiento de la emoción se usó una red neuronal artificial que fue previamente entrenada con cientos de rostros en diferentes estados emocionales o afectivos (aburrido, confundido, interesado, etc.).

Para desplegar la realidad aumentada se requiere de diversos elementos: una cámara que capte una imagen del espacio real, un programa que interprete y reconozca la imagen captada y que pueda hacer la fusión con el entorno real, y una pantalla donde se pueda observar la combinación de la realidad con elementos virtuales y los marcadores. Para que se efectúe el reconocimiento de un marcador es necesario colocarlo en el campo de visión de la cámara, de tal manera que la cámara pueda detectar el patrón adecuadamente. En este proceso es importante el motor de realidad aumentada, el cual, al reconocer el marcador, superpone los elementos digitales (p. ej., imágenes, objetos 3D o animaciones) sobre el objeto, para poder asignar algún proceso o realizar alguna operación en específico y así tener el objeto ya aumentado. ARGeo fue probado y evaluado por

estudiantes de nivel secundaria con edades entre 13 y 15 años (Zatarain y cols., 2019).

Ambiente de aprendizaje para fracciones

 *Aprende fracciones*¹ es un ambiente de aprendizaje que adapta su presentación y contenido de acuerdo con el estilo de aprendizaje del estudiante en función de sus rasgos de personalidad. El estilo de aprendizaje se infiere a través de la personalidad que presenta el estudiante al ingresar al sistema. La aplicación, la cual fue desarrollada por el autor de este artículo junto con dos estudiantes de nivel posgrado, utiliza un algoritmo de aprendizaje de máquina previamente entrenado para reconocer la personalidad de un estudiante a través de su voz. El estudiante, al iniciar la aplicación, responde varias preguntas usando el micrófono; esta señal (la voz) es capturada y enviada al algoritmo que calcula los rasgos de personalidad y de acuerdo con éstos determina el mejor estilo de aprendizaje del estudiante con base en el modelo de estilos de aprendizaje de Felder-Silverman (1988). La **Figura 6** muestra las interfaces para las cuatro variantes de estilos de aprendizaje disponibles para despliegue, de acuerdo con la personalidad del estudiante. La aplicación fue probada y evaluada por estudiantes de nivel básico (segundo grado de secun-

¹ Puede accederse a esta aplicación en: <https://fraction-learning-env.web.app/>.

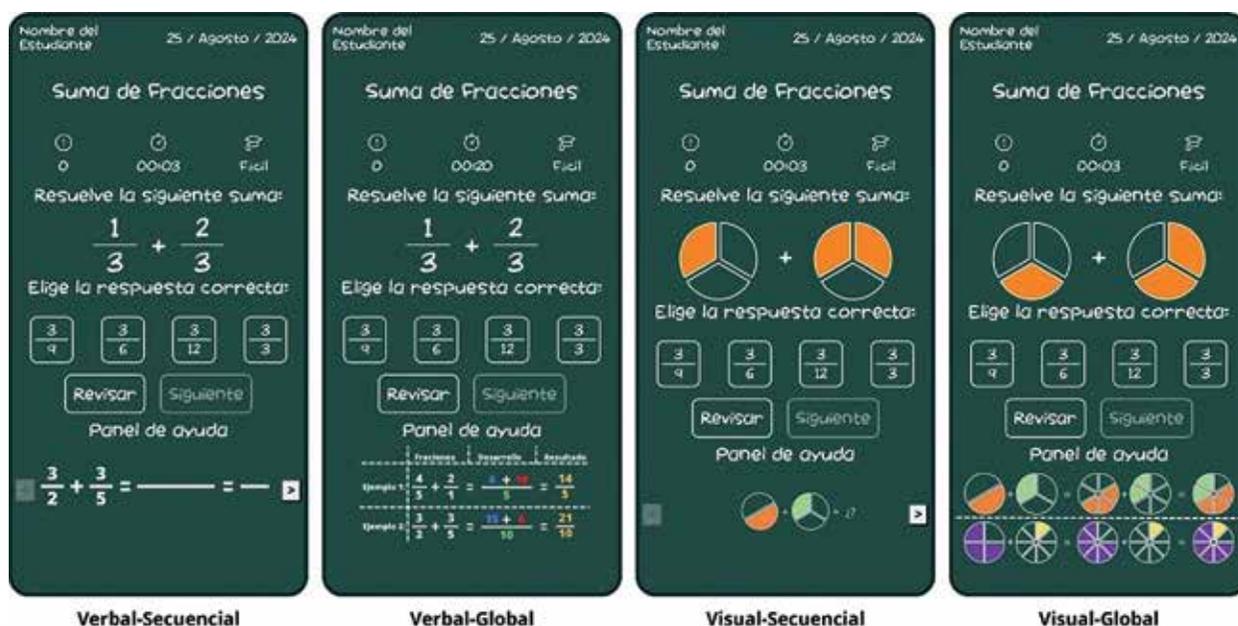


Figura 6. Interfaces para las cuatro variantes de estilos de aprendizaje. Imagen del autor.

daria) (Camacho, 2024), pero también podría ser usada por estudiantes de nivel primaria.

ReAQ: ambiente de aprendizaje de química

ReAQ fue desarrollado en el Instituto Tecnológico de Culiacán por tres investigadores (uno de ellos el autor de este artículo) y un estudiante de doctorado

(Uriarte-Portillo y cols., 2022). Es una aplicación de realidad aumentada basada en marcadores, enfocada en los temas de enlaces y reacciones químicas, que forman parte de la asignatura de Ciencias III, énfasis en Química, de las escuelas secundarias de México.

ReAQ le proporciona al alumno información necesaria para identificar los elementos químicos, reconocer su símbolo atómico, su peso atómico, su masa atómica, visualizar su representación (ya sea su estructura molecular o una figura tridimensional), así como su descripción.

Además, ReAQ contiene una serie de ejercicios que el estudiante debe resolver utilizando los marcadores de realidad aumentada; por ejemplo, para el ejercicio “Enlaces covalentes”, que se presenta en la Figura 7, el estudiante tiene disponibles siete marcadores con los símbolos de hidrógeno, oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre, cloro y potasio. El objetivo del ejercicio es colisionar dos marcadores de los siete disponibles y formar cinco enlaces. Cuando el estudiante realiza correctamente la colisión de los marcadores, en la pantalla del dispositivo se despliega información sobre la electronegatividad de cada elemento. Además, aparece una animación tridimensional que representa al compuesto químico del enlace. Finalmente, en ReAQ se almacena infor-



Figura 7. Ejercicio de enlaces covalentes. Tomado de Uriarte-Portillo y cols., 2023.

mación de los estudiantes en cuanto a sus aciertos, errores, ayudas y tiempo de cada ejercicio resuelto para, así, mediante el apoyo de un sistema exper-

to difuso, poder decidir la complejidad del siguiente ejercicio que deberá resolver el estudiante.



■ Conclusiones

■ Los sistemas educativos utilizan la tecnología para motivar a los estudiantes o incrementar su interés por aprender, además de apoyar el proceso de enseñanza y aprendizaje logrando mejorar el rendimiento. Respondiendo a la pregunta planteada en la introducción de este escrito, se ha demostrado que los ambientes de aprendizaje inteligentes y afectivos son muy eficaces en su objetivo de personalizar el aprendizaje del estudiante, al considerar aspectos cognitivos y afectivos y mejorar la motivación.

Ramón Zatarain Cabada

Instituto Tecnológico de Culiacán.

rzatarain@itculiacan.edu.mx

Lecturas recomendadas

- Barrón Estrada, M. L. y R. Zatarain Cabada (2024), “La computación afectiva en la educación”, *Komputer Sapiens*, 16(2):7-11.
- Bricio Barrios, E. E., S. Santiago Arceo Díaz y F. D. Mirelez Delgado (2024), “Incorporación de ChatGPT como herramienta para la enseñanza de Ciencias Básicas”, *Komputer Sapiens*, 16(2):30-35.

Referencias específicas

- Camacho, R. A. (2024), *Análisis de Sentimientos aplicando modelos basados en Transformers*, tesis de maestría en Ciencias de la Computación, México, Instituto Tecnológico de Culiacán.
- Cárdenas, A. (2023), *Interfaces naturales de usuario aplicadas en ambientes de aprendizaje*, tesis de doctorado en Ciencias de la Computación, México, Instituto Tecnológico de Culiacán.
- González-Hernández, F., R. Zatarain-Cabada, M. L. Barrón-Estrada y H. Rodríguez-Rangel (2018), “Recognition of learning-centered emotions using a convolutional neural network”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(5):3325-3336.
- Graesser, A. C., S. Lu, G. T. Jackson, H. H. Mitchell, M. Ventura, A. Olney y M. M. Louwerse (2004), “AutoTutor: A tutor with dialogue in natural language”, *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 36:180-192.

- Felder, R. M. y L. K. Silverman (1988), “Estilos de aprendizaje y enseñanza en la educación en ingeniería”. *Educación en ingeniería*, 78:674-681.

- Zatarain-Cabada, R., M. L. Barrón-Estrada, B. Ibáñez-Espiga y A. Uriarte Portillo (2019), “Cuerpos y planos geométricos usando realidad aumentada y computación afectiva”, *Research in Computing Science*, 147(8):203-213.

- Uriarte-Portillo, A., M. B. Ibáñez, R. Zatarain-Cabada y M. L. Barrón-Estrada (2022), “Higher immersive profiles improve learning outcomes in augmented reality learning environments”, *Information*, 13(5):218.

- Uriarte-Portillo, A., M. B. Ibáñez, R. Zatarain-Cabada y M. L. Barrón-Estrada (2023), “Comparison of using an augmented reality learning tool at home and in a classroom regarding motivation and learning outcomes”, *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(3):23.

- Zatarain-Cabada, R., M. L. Barrón-Estrada, F. González-Hernández, R. Oramas-Bustillos y C. A. Reyes-García (2018), “An affective and Web 3.0-based learning environment for a programming language”, *Telematics and Informatics*, 35(3):611-628.

- Zatarain-Cabada, R., H. M. Cárdenas y H. J. Escalante (2023), *Multimodal Affective Computing: Technologies and Applications in Learning Environments*, Alemania, Springer International.

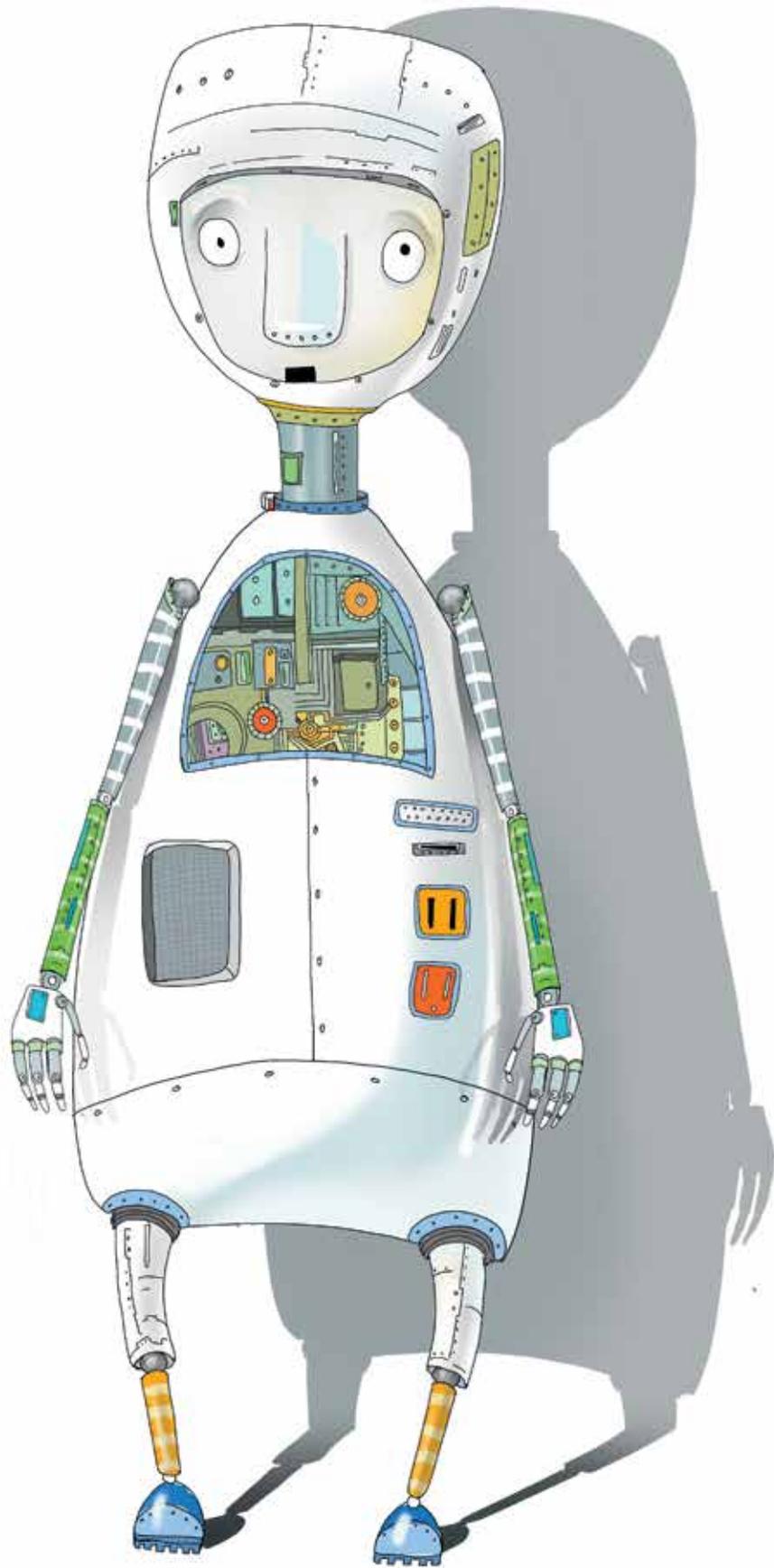
Técnicas de inteligencia artificial para la operación de robots de servicio

¿Cómo se ha usado la inteligencia artificial en los robots de servicio? Aquí te lo contamos. Partimos de los métodos tradicionales de la robótica, luego pasamos a cómo se utilizaron los métodos reactivos y los basados en datos, hacemos mención también de las redes neuronales generativas y cómo se pueden utilizar en los robots de servicio y, por último, presentamos las competencias de robots que se han organizado en el país a partir de los años noventa y cómo éstas han promovido la robótica de servicio en México.

La inteligencia artificial (IA) es una especialidad dentro de la computación que se ocupa de crear sistemas que puedan replicar la inteligencia humana y las habilidades para resolver problemas. El primer trabajo en el campo de la inteligencia artificial fue realizado a mediados del siglo xx por el matemático británico y pionero en computación Alan Turing. En 1950 Alan Turing publicó “Computer Machinery and Intelligence”, que proponía una prueba de inteligencia de las máquinas, llamada The Imitation Game. En 1952 Arthur Samuel desarrolló un programa para jugar a las damas chinas, que fue el primer programa en aprender el juego de forma independiente. En 1956 John McCarthy llevó a cabo un taller de computación en Dartmouth, en donde por primera vez se usó el término “inteligencia artificial”.

Al principio se resolvían problemas con IA, usando lógica clásica, a través de la demostración de teoremas, con una representación simbólica del mundo. Se usaban (y siguen usando) lenguajes de programación llamados declarativos, en los cuales se programa utilizando axiomas (reglas), predicados (hechos) y operadores. Los lenguajes más utilizados son Lisp, Prolog, Clips, etc. En esta primera etapa se desarrollaron los algoritmos de búsqueda en redes topológicas más importantes, como son los algoritmos de A* y de Dijkstra.

Al mismo tiempo, empezó el desarrollo de la IA utilizando como ejemplo a la naturaleza. Así, el modelo matemático básico de una neurona fue inventado,



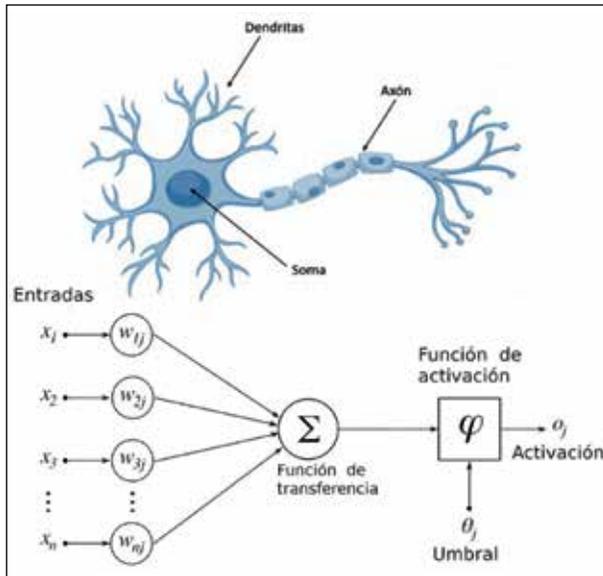


Figura 1. Modelo de una neurona. Crédito: Vázquez Silva, 2021.

en 1943, por el neurofisiólogo Warren McCulloch (véase la Figura 1). El perceptrón fue inventado por Frank Rosenblatt en 1957, en Cornell, en el que la función de activación es un escalón. El rechazo del perceptrón por parte de la comunidad de IA simbólica (Marvin Minsky) porque no resolvía la función lógica XOR hizo que se estancara su desarrollo, hasta que se inventaron las redes neuronales y el algoritmo de retropropagación para encontrar los pesos de la red en los años ochenta.

A partir del siglo XXI, con la cantidad inmensa de datos que existen en internet por las redes sociales, y aunado esto al desarrollo de tarjetas gráficas (llamadas GPU por sus siglas en inglés) –inicialmente impulsadas por los videojuegos–, fue posible entrenar redes neuronales con una cantidad muy grande de capas y pesos, dando como resultado las redes neuronales profundas.

Los robots de servicio son sistemas de *software* y *hardware* cuyo objetivo es simplificar el trabajo humano en la logística, los hogares, las oficinas, las tiendas, etc. Este tipo de robots son dispositivos móviles programables que ofrecen servicios en forma automática o semiautomática. Ellos se encuentran en ambientes dinámicos y complejos. Su autonomía consiste en la habilidad de tomar decisiones basadas en una representación interna del mundo. Asi-

mismo, efectúan cambios en el entorno mediante la ejecución de acciones. Han surgido de áreas de investigación como la inteligencia artificial, el procesamiento de señales y la teoría de control.

Para cumplir con tareas difíciles, los robots de servicio necesitan tener las siguientes capacidades básicas: ser reactivos, es decir, reaccionar oportuna y apropiadamente a eventos imprevistos, y ser capaces de resolver tareas por medio de planes. A diferencia de los robots industriales, estos robots navegan en los espacios que les han sido asignados. Así como los televisores, radios, computadoras y los teléfonos celulares se incorporaron a la vida cotidiana, los robots de servicio ya lo están haciendo y son cada vez más familiares. En el campo de los robots de servicio se han desarrollado tres paradigmas muy bien marcados: la arquitectura tradicional, la reactiva y la basada en datos.

Los modelos tradicionales

En este caso, se tiene una representación del medio ambiente con una representación simbólica de los objetos en un espacio determinado y se planean los movimientos y las acciones usando técnicas de inteligencia artificial tradicionales de búsquedas en redes topológicas (Figura 2). Asimismo, tienen una

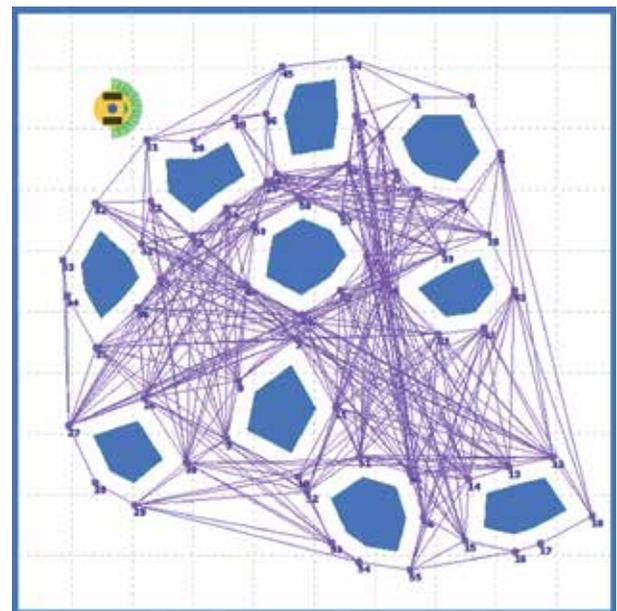


Figura 2. Representación simbólica del medio ambiente con una red topológica. Crédito: Savage, 2023.



Figura 3. Robot Shakey de la Universidad de Stanford. Crédito: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shakey_the_Robot_\(developed_between_1966-1972_at_SRI_International\)_-_Computer_History_Museum_\(2007-11-10_23.16.01_by_Carlo_Nardone\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shakey_the_Robot_(developed_between_1966-1972_at_SRI_International)_-_Computer_History_Museum_(2007-11-10_23.16.01_by_Carlo_Nardone).jpg)

organización serial, de modo que, si un módulo falla, todo el sistema falla. Este tipo de sistemas no es adecuado para entornos dinámicos ni para robots que presentan errores en el movimiento y en el **sensado**.

El robot Shakey fue el primer ejemplo de esta arquitectura, desarrollada en el periodo de 1966-1972 en la Universidad de Stanford. Este modelo se muestra en la **Figura 3**.

Modelos reactivos

Éstos están basados en el comportamiento de los insectos. No es necesaria una representación del medio ambiente ni se utiliza planeación de acciones ni de movimientos. Adecuados para entornos dinámicos y con errores en el sensado, están basados en comportamientos que funcionan en paralelo. Estos últimos se pueden diseñar usando lógica de orden cero, **máquinas de estados**, **campos potenciales** y redes neuronales, entre otras técnicas. Se pueden entonces tener varios comportamientos en paralelo, en



Figura 4. Robot Genghis del MIT. Crédito: www.robotsguide.com.

forma jerárquica, y un árbitro decide, dependiendo de la jerarquía, cuál es la salida de comportamiento que se enviará a los actuadores del robot. Este paradigma afirma que el comportamiento inteligente en los robots puede lograrse mediante la interacción de muchos comportamientos simples. Genghis, un robusto andador hexápodo, es un ejemplo de esta arquitectura, desarrollada por Rodney Brooks en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en los años ochenta, el cual se muestra en la **Figura 4**.

Modelos basados en datos y probabilísticos

Estos modelos utilizan una cantidad inmensa de datos, con los que se entrenan redes neuronales artificiales combinadas con técnicas probabilísticas. Se utilizan cadenas de Márkov ocultas (Hidden Markov Model, HMM), filtros de partículas, procesos de decisión de Márkov, etc. Stanley, un vehículo autónomo, el cual se muestra en la **Figura 5**, creado en la Universidad de Stanford en 2005 bajo la dirección de Sebastian Thrun, es un ejemplo de esta arquitectura.

Modelos híbridos

Se combinan las arquitecturas tradicionales, reactivas, las basadas en datos y las probabilísticas para suplir las deficiencias de cada una de ellas. La robot Justina, mostrada en la **Figura 6**, ha sido desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y utiliza esta arquitectura para su funcionamiento.

Sensado

Se utilizan sensores para capturar el medio ambiente en donde opera el robot. Pueden ser cámaras, micrófonos, sensores de temperatura, giroscopios, ultrasonido, láser o brújulas electrónicas.

Máquinas de estados

Dispositivos que contienen una descripción de un sistema usando el concepto de estados; se utilizan para ejecutar algoritmos.

Campos potenciales

Concepto matemático que se utiliza para modelar interacciones entre objetos o partículas en campos como la física, la robótica y la inteligencia artificial.



Figura 5. Robot Stanley de la Universidad de Stanford. Crédito: Wikipedia.org.

Capacidades de los robots de servicio

Para poder interactuar en un medio ambiente, un robot de servicio requiere ser capaz de reconocer comandos de voz, objetos, personas (rostros, gestos y acciones), lugares, etc. Para poder reconocer objetos en el medio ambiente, desde hace unos años se utilizan las redes neuronales profundas (véase la Figura 7), las cuales cuentan con una cantidad muy grande de neuronas.

Para poder reconocer objetos comunes como mesas, sillas, pelotas, plátanos, platos, etc., en el robot Justina se usan redes neuronales convolucionales, reconocimiento para el que la principal dificultad que encontramos fue conseguir datos de entrenamiento. Lo que nos costó más trabajo fue tener una canti-



Figura 6. Robot Justina de la UNAM. Crédito: BioRobotics/UNAM (en línea).

dad grande de imágenes, pero se superó gracias a la captura de muchos videos y a su segmentación y etiquetado, de modo que pudieran servir durante el entrenamiento. Para encontrar los parámetros de una red neuronal, se necesita una cantidad inmensa de imágenes de muestras de entrenamiento, imágenes que por lo regular no están disponibles para ser

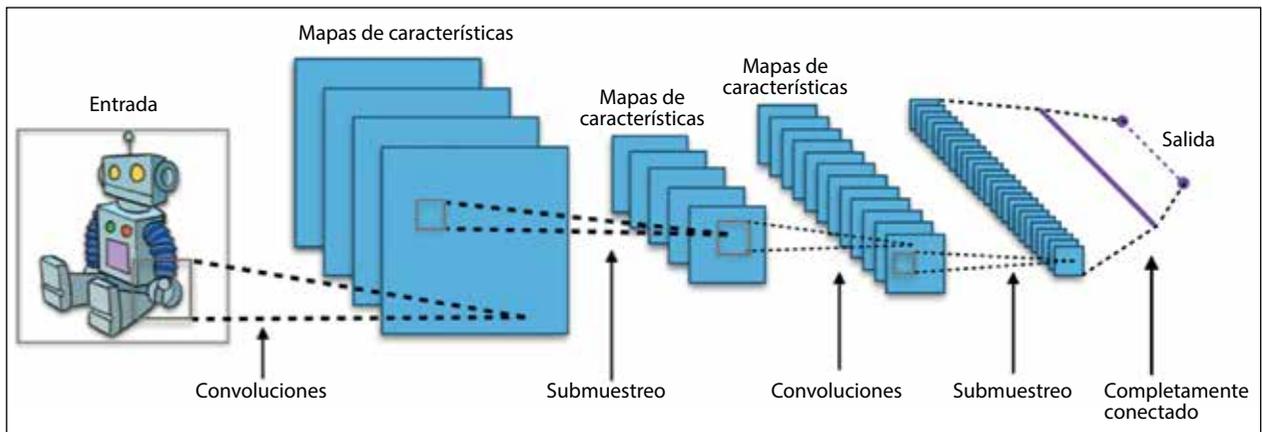


Figura 7. Red neuronal convolucional. Crédito: "Typical cnn architecture", Wikimedia Commons.

utilizadas; sin embargo, actualmente existen redes neuronales profundas que ya han sido entrenadas previamente y lo único que se tiene que hacer es reentrenarlas con los objetos particulares que se quiere reconocer.

Aprendizaje de los robots usando simuladores

 Construir un robot puede ser costoso por el *hardware* requerido en lo referente tanto a sensores como a unidades de procesamiento; por ello, los simuladores representan una alternativa para aprender nuevos comportamientos. Además, los simuladores presentan la ventaja de que permiten hacer experimentos en mucho menos tiempo que con un robot real. En el cuento “Sueños de un robot”, del escritor de ciencia ficción Isaac Asimov, se describen robots que tienen la capacidad de soñar. Pero, ¿de qué le serviría a un robot soñar? Con imágenes simuladas, el robot puede estar entrenando en nuevos entornos mientras está en modo de reposo y así aprender nuevos comportamientos.

Inteligencia artificial generativa

 La inteligencia artificial generativa está basada en un tipo de redes neuronales retroalimentadas con muchos componentes, las cuales han sido entre-

nadas con una cantidad inmensa de datos tomados de internet. Estas redes pueden generar contenidos a través de modelos de lenguaje y pueden generar texto, imágenes (como la mostrada en la **Figura 8**), videos, voz sintética, música o códigos de programas.

Una de las redes más populares es la Generative Pretrained Transformer (GPT), basada en una red neuronal llamada Transformer, la cual es una arquitectura de aprendizaje profundo desarrollada por Google, propuesta en “Attention Is All You Need” (Vaswani y cols., 2017). Algunos consideran que este artículo es un documento fundacional para la inteligencia artificial moderna, ya que los Transformers se convirtieron en la arquitectura principal de los modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM, por sus siglas en inglés). ChatGPT es un ejemplo de este tipo de inteligencia artificial generativa, la cual es en realidad un perico cibernético que, dado un conjunto de palabras, va prediciendo cuál es la palabra más probable que debe seguir, de acuerdo con la forma como fue entrenada. Se puede usar para generar diálogos entre humanos y robots, puede hacer ensayos, redactar reportes y generar códigos de computadoras. En el futuro cercano, los robots de servicio podrían utilizar ChatGPT para dialogar e interactuar con los seres humanos.

Los usos de la inteligencia artificial basados en métodos tradicionales, en la lógica simbólica, los basados



Figura 8. Imagen generada para entrenar a robots de servicio. Crédito: ai2thor.org (<https://ai2thor.allenai.org/ithor>).

en datos y los que se valen de redes neuronales han contribuido todos a que el desarrollo de la robótica de servicio haya avanzado mucho en los últimos años.

Competencias de robótica en México

Las competencias de robots que se han organizado en México a partir de los años noventa han promovido mucho la robótica de servicio en el país. En 1997, en la ciudad de Querétaro, se organizó el Concurso Nacional de Robótica (CNR), con la participación de estudiantes de esta área de todo el país. Una de las categorías principales fue la de robots seguidores de líneas pintadas en el piso. Equipos de robótica de varias universidades del área metropolitana de la Ciudad de México participaron en esta competencia, pero los resultados que obtuvieron no fueron muy alentadores y las instituciones decidieron, por tanto, entrenar a sus estudiantes y propiciar que compitieran entre ellos para que llegaran mejor preparados. Así, estudiantes del ITAM, del ITESM-CEM, de la Universidad Iberoamericana y de la UNAM se reunían para hacer competencias informales entre ellos y practicar.

De este modo, el desempeño en el CNR en los años siguientes mejoró en forma sustantiva. En 1999 se acordó con los organizadores del CNR que se tuvieran competencias regionales para que después los campeones de éstas se presentaran en el nacional en la ciudad de Querétaro. Así, en 1999 se organizó el primer Concurso Metropolitano de Robótica de la Ciudad de México en las instalaciones de Universum, en la UNAM. Después, en el 2000, se llevó a cabo en el ITAM; en el 2001, en la Universidad Iberoamericana; en el 2002, en el ITESM-CEM; en el 2003, en el IPN, y en 2004, en el ITESM Cuernavaca. En esta competencia se tuvo una reunión con los organizadores del Torneo de Robots Limpiadores de Playa, que habían estado organizando competencias de robots en los estados de Puebla y Veracruz. En el 2005 la competencia fue en la Universidad La Salle. Se acordó entonces que se unieran el Concurso Metropolitano de Robótica con el Torneo de Robots Limpiadores de Playa para organizar el Torneo Mexicano de Robótica (TMR). Así, en 2008 se organizó el primer Torneo Mexicano de Robótica en el Palacio de Minería de

la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Figura 9). La respuesta de los participantes y el interés del público en general fue muy grande, así como la cobertura que hicieron los medios.

Por otra parte, a partir del 2002, equipos mexicanos de robótica comenzaron a participar en la competencia internacional más importante de robots, el RoboCup, primero con equipos del ITESM-CEM y después del ITAM. Desde entonces, la participación mexicana ha crecido, principalmente con equipos del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), la Universidad La Salle, la UNAM, etc., en las siguientes ligas: Robots Aibos, Small Size, Humanoid KidSize, Simulación de Fútbol, @Home, Junior Rescue, Junior Soccer, Junior Dance, Junior CoSpace y @Work. Algunas de estas categorías se incluyeron en el primer TMR de 2008, que fue reconocido por la Federación Mundial del RoboCup como RoboCup Mexican Open.

Durante el RoboCup 2006, en Bremen, Alemania, los equipos mexicanos que participaron en el evento se dieron cuenta de que en las ligas Junior (pensadas para participantes entre 12 y 19 años) no hubo equipos mexicanos, ni ningún equipo latinoamericano. Así, un grupo de profesores decidió llevar al menos un equipo junior para la próxima RoboCup, que tendría lugar en 2007, en Atlanta, EUA. Con el fin de lograr este objetivo se inició un programa en el segundo semestre de 2006 en el sistema de bachillerato de la UNAM, a fin de preparar a sus docentes para la enseñanza de habilidades de robótica y progra-



Figura 9. Torneo Mexicano de Robótica en el Palacio de Minería, en el 2008. Crédito: BioRobotics/UNAM (en línea).

mación. Gracias a estas iniciativas, el primer equipo mexicano junior participó en la RoboCup en 2007, y en 2014 un equipo de bachillerato de la UNAM obtuvo el primer lugar en la liga Junior CoSpace.

Un efecto positivo secundario es que hemos notado que la mayoría de los estudiantes que participan en las ligas junior luego deciden continuar con estudios en ingeniería o ciencias. Paralelamente a estos esfuerzos, se iniciaron clubes de robótica en el ITAM, en la UNAM y en otras universidades. Estos clubes les dan a los estudiantes la oportunidad de aprender conceptos básicos de robótica como formación curricular extra, y se han abierto principalmente en las tardes y los sábados. Además, se han realizado esfuerzos para desarrollar y mejorar cursos que ayuden a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica e Informática que se especializan en robótica.

Federación Mexicana de Robótica

En 2010, se creó la Federación Mexicana de Robótica (FMR) para supervisar estos esfuerzos. La FMR agrupa a profesores investigadores que han estado colaborando durante más de 15 años en la organización de asociaciones nacionales y eventos internacionales de robótica, y que están afiliados a algunas de las universidades e institutos de investigación más prestigiosos de México. Los principales objetivos de la FMR incluyen: fomentar el desarrollo de la robótica en México; organizar competencias de robótica regionales, nacionales e internacionales; establecer colaboraciones con grupos similares en todo el



Figura 10. Robots tipo humanoide jugando fútbol en el RoboCup, llevado a cabo en la Ciudad de México en 2012. Crédito: BioRobotics/UNAM (en línea).

mundo; organizar redes de investigación en robótica y otros campos relacionados, y difundir los resultados de la investigación y desarrollo en el campo de la robótica entre el público. En 2012 la Federación RoboCup, junto con la FMR, organizaron el RoboCup en la Ciudad de México, con una asistencia de alrededor de 2 500 participantes extranjeros y un estimado de 35 000 espectadores. Hubo un gran interés en este evento por parte de la sociedad mexicana y la cobertura mediática fue enorme. En la **Figura 10** se observa a un grupo de robots jugando fútbol.

Jesús Savage Carmona

Facultad de Ingeniería, UNAM.
robotssavage@gmail.com

Marco Antonio Negrete Villanueva

Facultad de Ingeniería, UNAM.
mnegretev@gmail.com

Lecturas recomendadas

Federación Mexicana de Robótica: <https://femexrobotica.org/>.

Laboratorio de Bio-Robótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, *Bio-Robotics /UNAM*: <https://biorobotics.fi-p.unam.mx/>.

Laboratorio de Mecatrónica y Robótica del Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional (CIC-IPN): <https://www.cic.ipn.mx/index.php/acerca-de-rym>.

Laboratorio de Robótica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE): <https://ccc.inaoep.mx/laboratorios/robotica>.

RoboCup Organization: <https://www.robocup.org/>.

“Robots” [dossier] (febrero de 2023), *Revista de la Universidad de México*, 893:6-100.

Savage, J. (2023), “Lección 5: planeación de movimientos”, Facultad de Ingeniería, UNAM. Disponible en: https://biorobotics.fi-p.unam.mx/wp-content/uploads/Courses/robots_moviles/2024-1/lecciones/Leccion_5.pdf.

Vaswani, A., N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones y cols., (2017), “Attention Is All You Need”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Annual Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach.

Vázquez Silva, E. (2021), *Categorización semántica de objetos a partir de la interacción humano-objeto*, tesis de maestría en Computación, UNAM.

Joaquín Salas, José Carlos Arenas y Antonio Briseño

Monitoreo de fenómenos sociales y ambientales mediante observaciones de la superficie terrestre

Se desarrolló un sistema de información geográfica (SIG) utilizando técnicas de inteligencia artificial (IA) para monitorear fenómenos sociales y ambientales mediante datos satelitales. El sistema detecta asentamientos humanos y analiza la vegetación en las áreas naturales protegidas de la CDMX, e infiere la claridad del agua en la Presa de Valle de Bravo, para tomar decisiones informadas.

Técnicas avanzadas para el monitoreo ambiental

Un sistema de información se establece para recopilar, guardar y examinar datos concernientes a un tema particular. Dichos sistemas adquieren una dimensión geográfica al integrar datos de geolocalización. Su origen se remonta a 1964, cuando la oficina del censo de EUA publicó los primeros 43 000 códigos de geolocalización. Los sistemas de información geográfica contemporáneos han evolucionado junto con la tecnología informática. Actualmente, Roger Tomlinson es reconocido como el pionero de los sistemas de información geográfica (SIG), pues en 1967 presentó uno para recolectar, examinar y manejar datos sobre los recursos de suelos, agricultura, recreación, fauna (incluidas aves en cuerpos de agua), bosques y la gestión del uso del suelo en una escala de 1:50 000 en Canadá. Una nota interesante sobre Tomlinson es que pasó sus últimos días en México, donde falleció en San Miguel de Allende en 2014.

Las áreas naturales protegidas (ANP) son zonas designadas donde se evitan actividades como desarrollos residenciales, industriales y comerciales, y donde la intervención humana está restringida. Las ANP permiten conservar la diversidad biológica. Son fundamentales para los ciclos del agua y del carbono, y tienen un papel importante en la regulación de la temperatura y los patrones climáticos. Por estas razones, las sociedades han optado por resguardar estas áreas de las actividades humanas, incluida la expansión de asentamientos cercanos. En el caso de la



Ciudad de México. Imágenes Landsat cortesía del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA y del Servicio Geológico de Estados Unidos o USGS/NASA Landsat.

Ciudad de México (CDMX), nos interesa saber cuál es su estado y cuál es la tendencia que su comportamiento histórico permite vislumbrar.

Este documento presenta un SIG diseñado para monitorear las 25 ANP de la Ciudad de México y la Presa de Valle de Bravo. El SIG emplea imágenes satelitales para analizar la dinámica de la vegetación, identificar patrones de crecimiento urbano y evaluar la claridad del agua. Estas imágenes captan la interacción de la luz solar con la superficie terrestre, revelando información valiosa sobre la composición de los suelos, la salud de la vegetación y la turbidez del agua. Al analizar múltiples bandas espectrales de las imágenes, podemos distinguir entre diferentes tipos de cobertura terrestre, como bosques, cuerpos de agua y áreas urbanizadas, y así detectar cambios en estos elementos a lo largo del tiempo. Nuestra propuesta consiste en combinar el monitoreo remoto con la inteligencia artificial (IA) para generar conocimiento útil en la toma de decisiones.

■ **Importancia del monitoreo ambiental**

■ Las ANP son albergues para la preservación de la biodiversidad de plantas y animales. La participación de cada especie dentro de las cadenas alimentarias propicia la generación de elementos ecológicos de gran valor. Considérense los bosques, que son el sumidero más importante de bióxido de carbono dentro de las masas continentales de la Tierra y tienen un papel importante en la captura y almacenamiento de carbono a través de la fotosíntesis. Las actuales estimaciones sugieren que 1 km² de bosque contiene entre 7.97 y 8.4 toneladas de CO₂ (Taylor y Marconi, 2019); si bien existe una gran incertidumbre asociada al carbono orgánico contenido en los suelos. Aunque el cambio climático nos obliga a buscar la eliminación de las emisiones de gases de efecto invernadero, la persistencia del CO₂ en la atmósfera tiene horizontes de miles de años, lo cual incrementa la importancia de los bosques.

La CDMX alberga 25 ANP, que abarcan un área de 232.6 km². Considerando que la superficie total de la CDMX es de 1 494.3 km² y que su población en 2020 era de 9 209 944 habitantes, el porcentaje del terri-

torio dedicado a ANP es del 15.6% o 25.3 m² por individuo. Estas cifras son relevantes ya que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, según sus siglas en inglés) ha elevado su recomendación a un 30%, sobre su anterior recomendación de 17% (Watson y cols., 2023). Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un mínimo de 9 m² por persona (Rivera y cols., 2018). La comparación con estándares permite determinar si nos encontramos dentro de los límites aceptables.

La CDMX requiere un poco más de 84 m³/s de agua para cubrir las necesidades de consumo humano (Palma y cols., 2022). Las fuentes de agua varían de acuerdo con la estacionalidad y el consumo. Sin embargo, estas fuentes incluyen el acuífero, sistemas externos y manantiales. Mediante pozos se extrae aproximadamente el 63% de las necesidades de agua. Un 27% adicional proviene de los sistemas Cutzamala y Lerma, mientras que los manantiales y el agua reciclada aportan el 10% restante. Actualmente, la CDMX cuenta con 63 plantas potabilizadoras distribuidas en ocho de sus delegaciones. Si bien estas plantas están encargadas de generar agua de calidad apta para consumo humano, resulta importante darles seguimiento en cada etapa de su distribución y tratamiento.

■ **Un sig soportado en IA**

■ Gracias a las observaciones históricas de las **plataformas satelitales**, podemos inferir que en los últimos años se ha presentado una reducción de las áreas vegetales en las ANP de la CDMX debido al crecimiento de asentamientos irregulares. Por su parte, la claridad del agua contenida en la Presa de Valle de Bravo ha tenido fluctuaciones importantes debido al cambio de los patrones de las lluvias y las descargas irregulares.

Sistema de información geográfica

El SIG se compone de tres módulos: detección de asentamientos irregulares, monitoreo de la claridad del agua y evaluación de la vegetación. El módulo de vegetación permite analizar las tendencias estacionales

Plataformas satelitales
Sistemas artificiales que circundan otros objetos para la observación y comunicación.

para cuantificar el nivel de procesamiento de clorofila de las plantas, indicativo de su salud y la pigmentación verde. Por otra parte, la medición de la claridad del agua se hace con el **disco de Secchi**, con el cual se estima la penetración luminosa en el agua. Por último, los asentamientos irregulares se miden por la proporción de área con asentamientos en las ANP.

Las imágenes satelitales para la determinación de la claridad del agua y el estudio de la vegetación provienen de la plataforma Landsat, la cual brinda una resolución de 30 metros por pixel. Para la detección de asentamientos, utilizamos Sentinel-2, con una resolución de 10 metros por pixel. Las imágenes satelitales son extraídas de repositorios públicos. Una vez recopiladas las imágenes, el análisis se realiza considerando las delimitaciones poligonales que identifican cada zona de interés. Posteriormente, se analizan los píxeles que componen los polígonos de las ANP. En el caso de los asentamientos, se utilizan bloques de 60×60 píxeles, que se introducen en un modelo de redes neuronales. Para los módulos de claridad del agua y vegetación, el análisis se realiza pixel por pixel. Sin embargo, en el caso de la vegetación, se emplea el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), mientras que la claridad del agua se analiza mediante un ensamble de modelos de **regresión** que incluyen Support Vector Regression (SVR), redes neuronales (NN) y Extreme Gradient Boosting (XGB). El NDVI puede variar entre -1 y 1 , donde los valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que los valores cercanos a 0 , o negativos, representan suelos descubiertos, cuerpos de agua o áreas urbanizadas. Un NDVI alto refleja una mayor biomasa y actividad fotosintética, lo que es indicativo de una vegetación vigorosa.

El SIG desarrollado es una herramienta para la visualización y análisis de datos geoespaciales, diseñada para facilitar la toma de decisiones. Su interfaz permite la selección de ANP, así como la especificación de año, mes y día del análisis. Los usuarios pueden navegar entre los módulos de vegetación, asentamientos y claridad del agua, interpretando la información mediante escalas de colores. Además, es posible descargar los datos utilizados para las visualizaciones. En la **Figura 1** podemos observar el mó-

dulo de vegetación, el cual muestra por medio de polígonos de colores los niveles del NDVI del Bosque de Tlalpan, en 2017, sobre un mapa de la CDMX.

Los asentamientos humanos

El SIG evalúa la expansión de los asentamientos humanos en las ANP. Para ello, utiliza **imágenes satelitales multiespectrales** y redes neuronales convolucionales (CNN). Empleamos un enfoque que combina las imágenes de Sentinel-2 con datos geográficos del World Settlements Layer. Al utilizar imágenes con una resolución espacial de 10 metros, podemos identificar cambios en la ocupación del suelo a lo largo del tiempo. El World Settlements Layer nos proporciona una referencia inicial de la ubicación de los asentamientos. Para obtener estimaciones más robustas y precisas de la dinámica de estos asentamientos, utilizamos el filtro de Kalman, el cual nos permite incorporar iterativamente información de mediciones, mejorando así nuestras predicciones sobre la expansión de los asentamientos.

En la **Figura 2a** presentamos el resultado del proceso de detección de asentamientos para el Bosque de Tlalpan. La línea azul denota la estimación de la proporción de ocupación, la cual rondaba el 0.8% en enero del 2021, y la zona sombreada refleja la incertidumbre en la estimación. En la ilustración observamos un crecimiento sostenido, tal que ahora nuestro estimado es de aproximadamente 1.6% hacia junio del 2024. También observamos algunas ANP para las cuales nuestra estimación muestra un decrecimiento, ya sea por desocupación o por una combinación entre la calidad de las imágenes y el umbral seleccionado para clasificar una zona como un asentamiento. Éste es el caso de San Miguel Topilejo, que mostraba una proporción de 0.22% en julio del 2021 y 0.14% en junio del 2024 (véase la **Figura 2b**) por la variabilidad de clasificación de unos pocos píxeles. En ambos casos, hemos superpuesto una línea punteada roja a los últimos tres años, entre junio del 2021 y junio del 2024. Al hacer este ejercicio con las 25 ANP de la CDMX observamos un patrón interesante (véase la **Figura 2c**). La ANP con menor proporción de ocupación es San Miguel Ajusco, con 0.04% , y la mayor es Lomas de Padier-

Disco de Secchi

Instrumento de medición de la transparencia del agua, formado por un disco que se sumerge y se observa desde la superficie.

Imágenes satelitales multiespectrales

Fotografías capturadas por satélites que registran información en varias bandas del espectro electromagnético.

Regresión

Técnica estadística que modela la relación entre variables independientes para predecir una variable de respuesta.

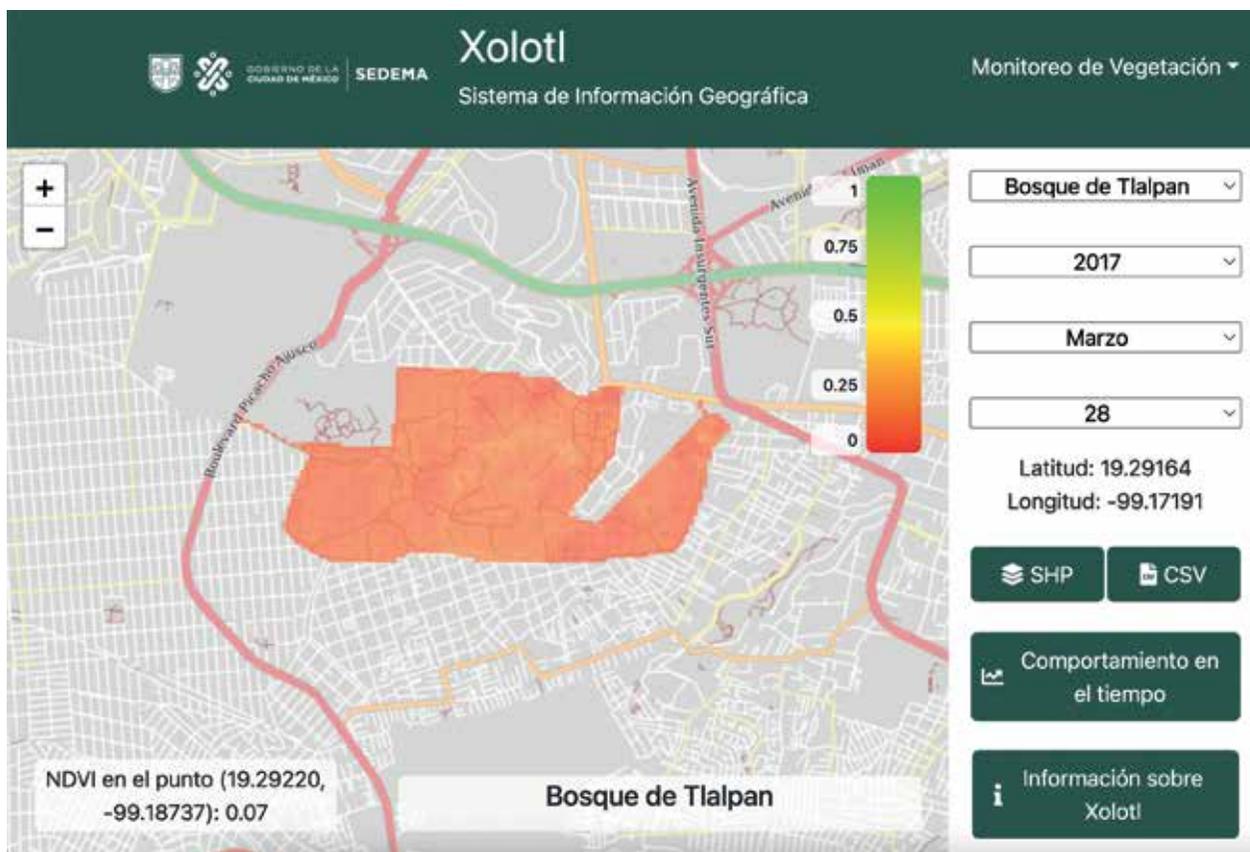


Figura 1. Un sistema de información geográfica (SIG) para el monitoreo ambiental. La interfaz del SIG puede mostrar, a través de polígonos de colores, los datos obtenidos en cada módulo. En este caso, se pueden ver los niveles del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del Bosque de Tlalpan, el 28 de marzo de 2017. El valor de NDVI está entre 0.2 y 0.25, lo cual indica una cobertura vegetal débil o intermitente.

na, con 53%. También observamos que la tasa de crecimiento guarda una relación muy cercana con la proporción de la ocupación; es decir, entre mayor es la proporción de ocupación, mayor es el crecimiento de la ocupación en los últimos tres años. De hecho, el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.97 entre ambas variables.

La vegetación

El seguimiento del estado de la vegetación lo realizamos mediante la observación de su NDVI. Analizamos las tendencias temporales de la vegetación en las 25 ANP de la CDMX usando las imágenes satelitales Landsat. El proceso metodológico se divide en tres etapas principales: cálculo del NDVI por pixel, enmascaramiento de nubes y aplicación del filtro de Kalman. Dado que las bandas espectrales necesarias para el cálculo del NDVI pueden verse afectadas por nubes y sombras, se aplica un procesamiento adi-

cional para detectar su presencia. La serie Landsat proporciona las bandas espectrales necesarias, y la corrección mediante el filtro de Kalman aumenta la cantidad de las mediciones.

Para profundizar en la comprensión de las dinámicas de la vegetación, utilizamos un análisis de tendencia estacional (STL o Seasonal Trend Loess), que permite separar la tendencia de la estacionalidad y el ruido residual, lo que facilita observar las tendencias subyacentes del NDVI en las ANP. Esta etapa se puede visualizar en la **Figura 3a**, donde se ve la tendencia del NDVI en Bosques de las Lomas.

Los resultados sugieren que la mayoría de las ANP mostraron un aumento en el NDVI durante el periodo de estudio (2000-2023), lo que indica una tendencia positiva en la salud y densidad de la vegetación. Sin embargo, ocho ANP presentaron una disminución en el NDVI, lo que podría requerir esfuerzos de conservación focalizados. Las excepciones identificadas subra-

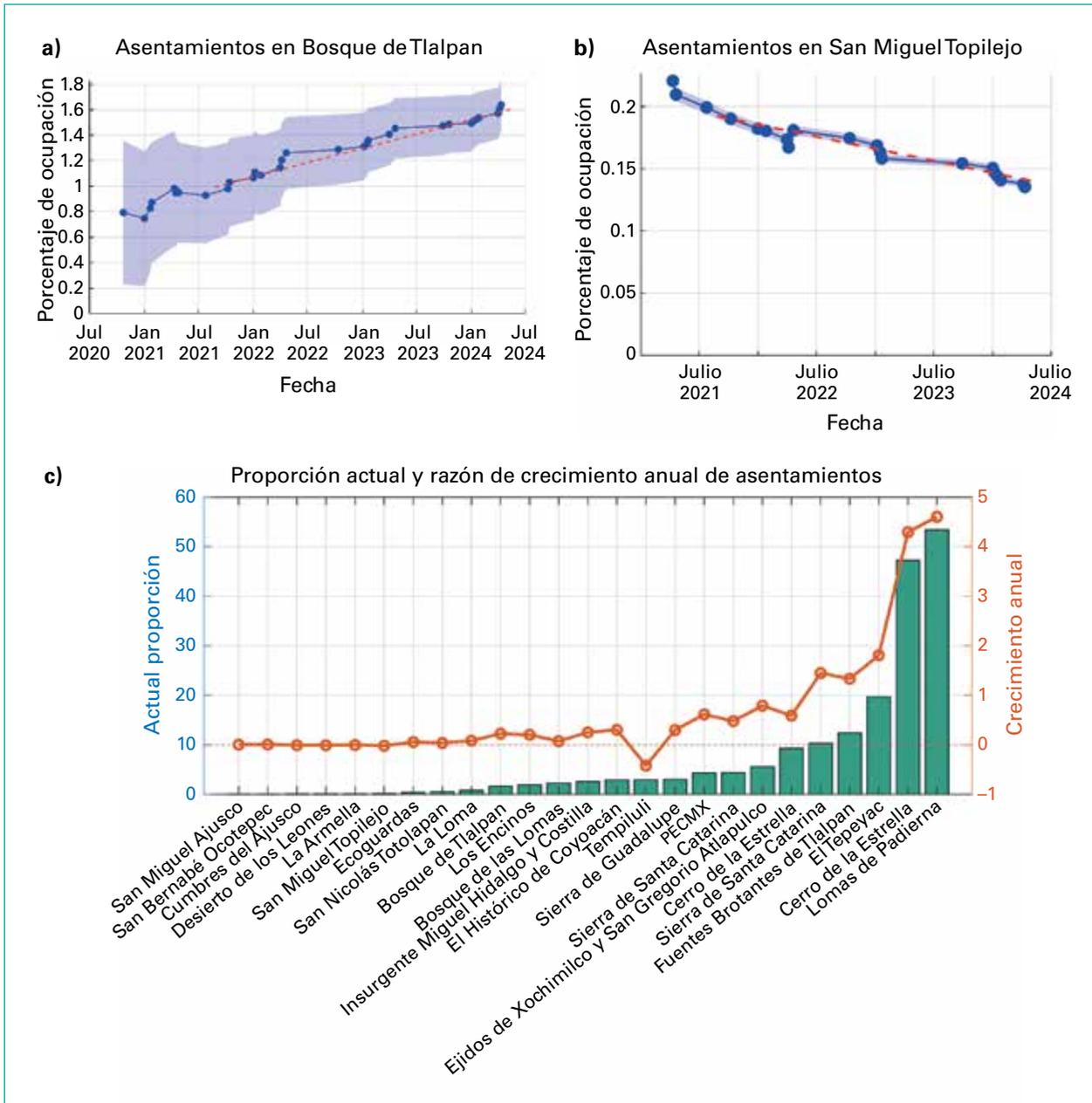


Figura 2. Asentamientos humanos en las ANP de la CDMX. La mayor parte de las ANP de la CDMX experimentan: a) crecimiento de los asentamientos humanos; aunque algunas experimentan, b) un decrecimiento sostenido. En general, el crecimiento anual ha dependido linealmente de la proporción de la ocupación durante los últimos tres años.

yan la complejidad de las dinámicas ecológicas y la necesidad de estrategias de manejo adaptadas a cada ANP.

La claridad del agua

El SIG permite la inferencia de la claridad del agua utilizando imágenes satelitales y técnicas de aprendizaje automático. Nuestra aproximación se centra en predecir la profundidad del disco de Secchi (SDD

o Secchi Disk Depth), como un símil de la transparencia del agua. Para ello, utilizamos imágenes del satélite Landsat y un conjunto de datos de AquaSat actualizados para Landsat 8. El estudio empleó modelos de regresión y un método de ensamblaje para mejorar la exactitud y precisión de las inferencias.

Durante la preparación de los datos, se actualizaron 33 261 observaciones multispectrales y de profundi-

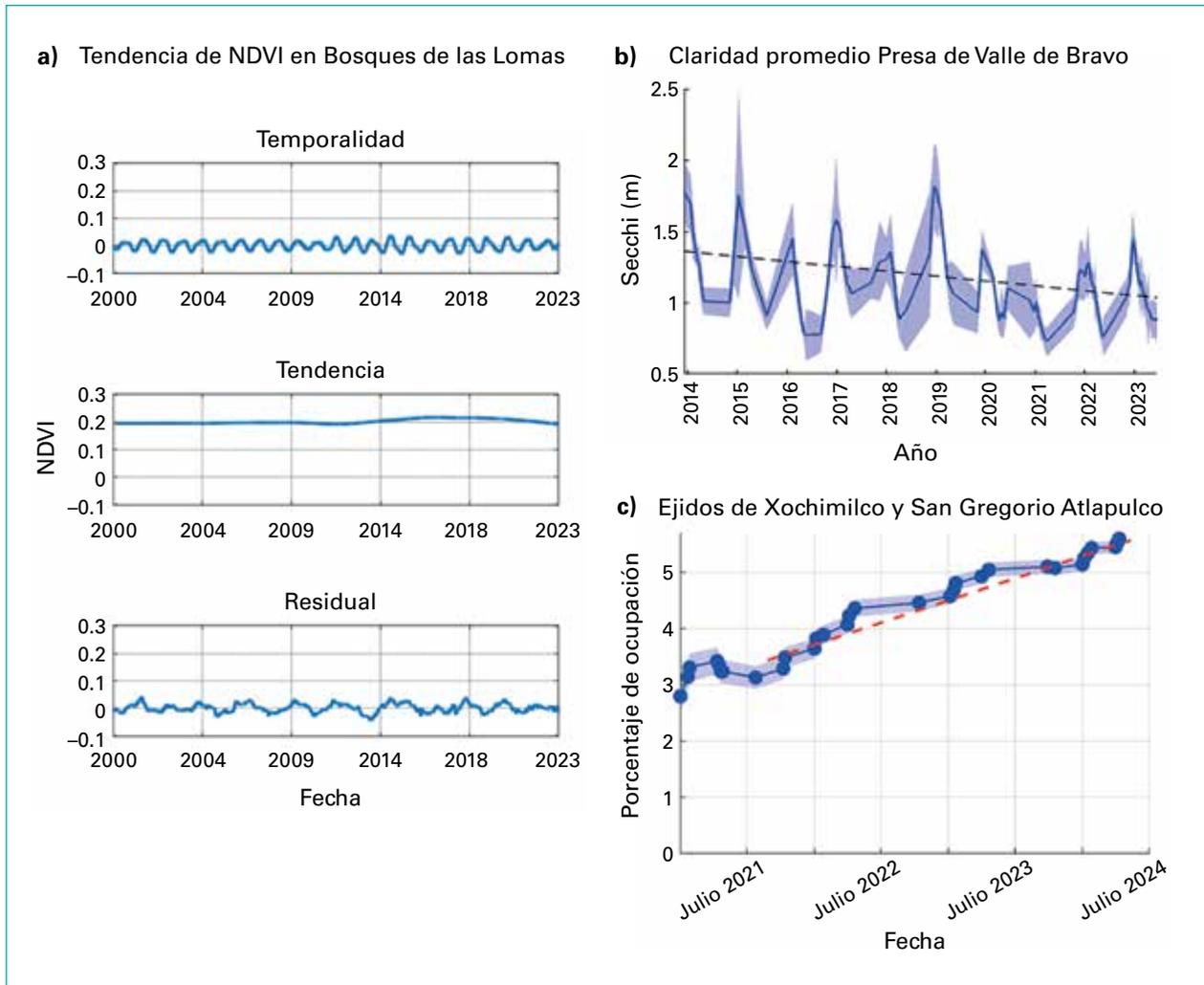


Figura 3. Variables ambientales de interés. El sistema permite dar seguimiento a las tendencias del estado de la vegetación, la claridad del agua y los asentamientos humanos en ANP a lo largo del tiempo. Por ejemplo: a) se determina el estado de la vegetación fuera de sus fluctuaciones estacionales; b) la claridad del agua, y c) la proporción de territorio que ocupan los asentamientos humanos para el ANP de Xochimilco.

dad con correcciones atmosféricas. Se entrenaron modelos de regresión como SVR, NN y XGB. El modelo de ensamblaje resultante mostró un rendimiento con un coeficiente de determinación promedio (R^2) de 0.663 y una desviación estándar de 0.007, mientras que la validación con datos de campo alcanzó un R^2 de 0.667. Estos resultados son prometedores, pues el SIG permite determinar la profundidad del agua en los cuerpos de agua sólo con el paso del satélite sobre el área de interés en un día sin nubosidad. Por ejemplo, la **Figura 3b** muestra la evolución de la claridad del agua durante los últimos diez años, donde se puede apreciar que ésta disminuye aproximadamente unos tres centímetros por año.

Adopción del sistema

El SIG que se describe fue desarrollado en el marco de un proyecto financiado por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la CDMX (Sectei). Durante su desarrollo, participó la Secretaría de Medio Ambiente (Sedema). El proyecto contó con la colaboración de profesores y estudiantes del Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Al final del proyecto, se puso en funcionamiento un SIG en los servidores del IPN. El acceso al servidor que contiene el SIG está restringido a los usuarios de la Sedema. Así, mientras que el SIG se mantiene

en operación en las instalaciones del IPN, tanto los códigos fuente como los manuales de instalación y operación fueron entregados a la Sedema.

■ Conclusión

■ Conocer la claridad de un cuerpo de agua, la extensión de los asentamientos humanos y la tendencia de la dinámica de la vegetación en las ANP tiene el potencial de permitir la definición de políticas públicas basadas en datos que refuercen lo que está bien y remedien lo que requiere corrección. El SIG que aquí se describe se apoya en nuestro más reciente entendimiento colectivo sobre cómo establecer el mapeo entre predictores obtenidos mediante observaciones satelitales y variables de respuesta para aplicaciones en la superficie relacionadas con fenómenos sociales y ambientales. El SIG opera con componentes de *software* abierto e imágenes de acceso libre, por lo que su funcionamiento requiere sólo una computadora y una conexión a internet para adquirir la información necesaria. Actualmente, este sistema es utilizado por la Sedema para su integración al monitoreo de las ANP y la Presa de Valle de Bravo. El SIG resuelve el problema de la obtención cuantitativa de indicadores que influyen en la toma de decisiones sobre las ANP y el agua que llega a la CDMX.

Este documento muestra que la IA puede aportar soluciones que faciliten la operación y conservación de las ANP, y que contribuyan a garantizar la calidad del agua que se consume en los centros urba-

nos. El desarrollo del SIG ejemplifica una aplicación que aprovecha las oportunidades que brinda el uso de observaciones remotas para resolver necesidades medioambientales de la CDMX. En el futuro, continuaremos refinando los algoritmos desarrollados en busca de incrementar sus niveles de desempeño y reducir sus márgenes de incertidumbre.

Agradecimientos

Este proyecto fue posible gracias al apoyo económico de la Sectei. Su alcance se ha visto fortalecido por la participación de estudiantes y profesores del IPN, la UNAM y el MIT, investigadores del Inegi y personal de la Sedema. Los autores agradecen a Sandra Navarro, Rubén Ulloa, Priscilla Baltezar, Jorge Prado, Sharaf Rashid, Jack Reid, Rodrigo Sepúlveda, Ranyart Suárez, Elio-Atenógenes Villaseñor y Danielle Wood por su participación en el proyecto.

Joaquín Salas

Instituto Politécnico Nacional.
jsalasr@ipn.mx

José Carlos Arenas

Instituto Politécnico Nacional.
red2013@hotmail.com

Antonio Briseño

Instituto Politécnico Nacional.
jcar.elias@gmail.com

Lecturas recomendadas

Palma, A., T. Parker y R. Carmona (2022), "Challenges and Experiences of Managed Aquifer Recharge in the Mexico City Metropolitan Area", *Groundwater*, 60(5):675-684. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1111/gwat.13237>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Rivera, C., A. Stähle, C. Spacescape, M. Kamiya, G. Aguinaga e Y. Siegel (2018), "Developing Public Space and Land Values in Cities and Neighbourhoods", *UN Habitat* [en línea]. Disponible en: <<https://shorturl.at/8ssGS>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Taylor, S. y S. Marconi (2019), "Rethinking global carbon storage potential of trees. A comment on Bastin *et al.*, 2019", *Annals of Forest Science*, 77:1-7. Disponible en: <<https://doi.org/10.1101/730325>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Watson, J., R. Venegas-Li, H. Grantham, N. Dudley, S. Stolton *et al.* (2023), "Priorities for protected area expansion so nations can meet their Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework commitments", *Integrative Conservation*, 2(3):140-155. Disponible en: <<https://doi.org/10.1002/inc3.24>>, consultado el 28 de enero de 2025.

Control inteligente de robots mediante gestos de la mano

La Smart Manufacturing, que forma parte de la industria 4.0, optimiza la manufactura mediante tecnologías avanzadas como inteligencia artificial, internet de las cosas —concepto que se explica más adelante— y la ciencia de datos. Estas tecnologías crean un entorno de producción eficiente y adaptable, conectando en tiempo real máquinas, sistemas y personas. Este artículo presenta un sistema ciberfísico para controlar robots colaborativos dentro de una **celda de manufactura** mediante reconocimiento de gestos.

Celda de manufactura

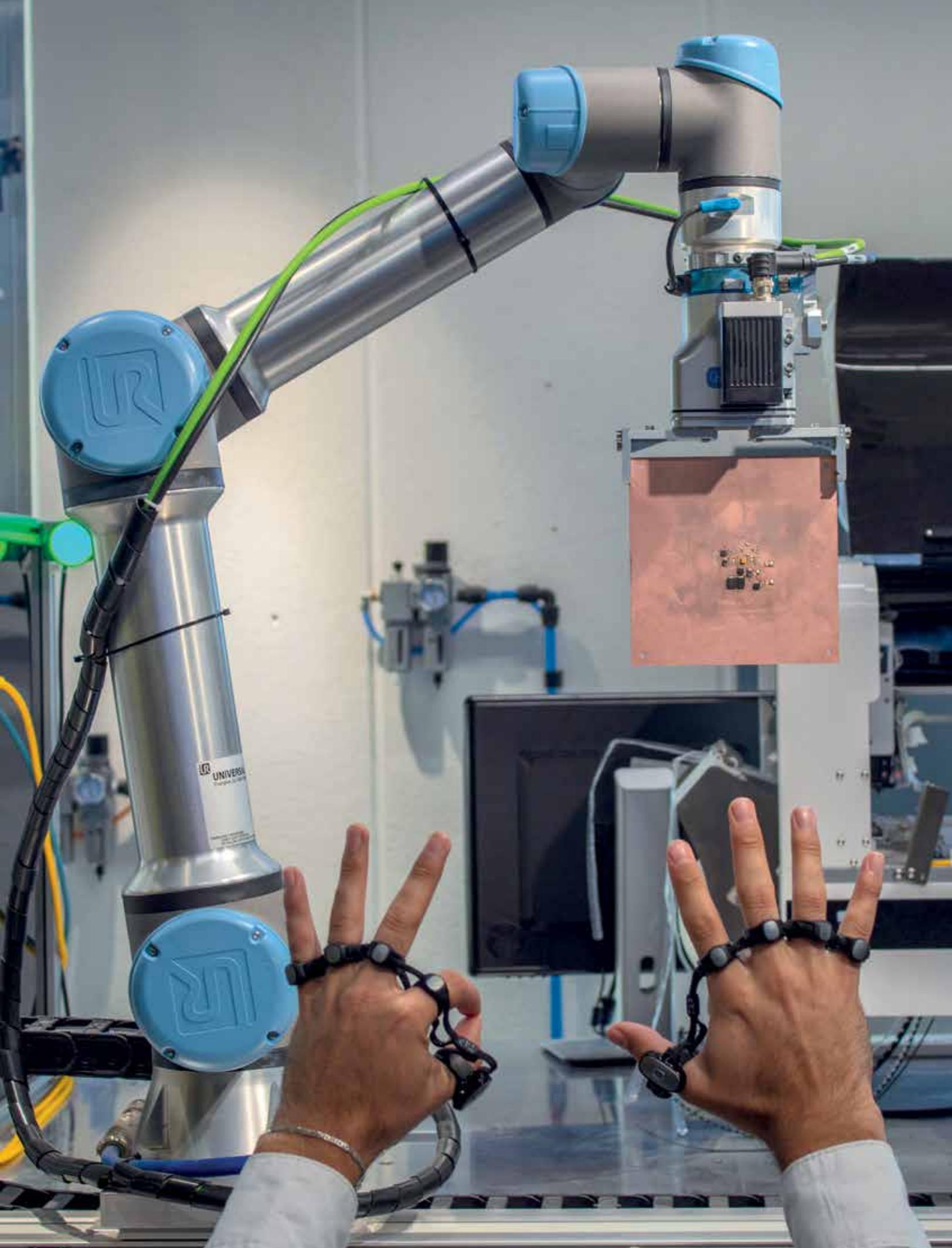
Sistema de producción automatizado y adaptable que utiliza tecnología avanzada.

Introducción

Imaginemos un futuro donde el ingenio humano y la tecnología convergen, uniendo lo tangible con lo intangible para superar las barreras físicas. Las manos, con sus gestos precisos, se convierten en el puente entre la mente y el mundo, facilitando no sólo nuestras tareas cotidianas, sino también el impulso vital de la productividad. Sin embargo, ¿qué ocurre cuando esas manos encuentran límites que les impiden moverse con libertad?

En las fábricas, donde el corazón de la industria late al compás de la colaboración entre operario y máquina, la exclusión de personas con capacidades motrices limitadas no sólo es una sombra sobre la inclusión social, sino una pérdida del valioso potencial humano. La falta de diversidad no sólo afecta a la persona, sino al dinamismo y la creatividad que florecen en la colaboración.

Frente a este desafío, la ciencia nos ofrece una respuesta: tecnologías habilitadoras que amplían horizontes. Este artículo explora cómo el reconocimiento de gestos, particularmente el movimiento de una mano, puede revolucionar los sistemas de producción, permitiendo que quienes enfrentan barreras físicas puedan controlar máquinas con la elegancia de un simple movimiento. Estas innovaciones no sólo impulsan la eficiencia de la industria 4.0, sino que tejen un futuro más inclusivo, donde el simple gesto humano transforma el mundo industrial.



Internet de las cosas

Red de objetos físicos ("cosas") que llevan incorporados sensores, con *software* para intercambiar datos a través de internet.

Sensor

Dispositivo que detecta y mide cambios en el entorno, como temperatura, presión o movimiento.

Acelerómetros

Dispositivos que miden la aceleración de un objeto.

Industria 4.0 y espacios ciberfísicos

La era de la industria 4.0 está marcada por la integración de máquinas inteligentes y sistemas que se comunican entre sí y con los humanos a través de diversas infraestructuras, como el **internet de las cosas** (IoT, por sus siglas en inglés). En el corazón de esta transformación están los espacios ciberfísicos: lugares donde el mundo digital y el físico se conectan. Aquí, los **sensores** actúan como puentes, recolectando datos del mundo real, enviándolos al mundo digital para su análisis y retroalimentando al mundo físico. Un ejemplo es el Tap Strap 2, un dispositivo que se coloca en la mano y que utiliza cinco sensores especiales llamados **acelerómetros**. Estos sensores permiten detectar cómo se mueve y gira cada dedo, para que así el dispositivo interprete gestos o acciones de la mano. Cuando aplicamos técnicas de inteligencia artificial, los datos de este dispositivo pueden ser utilizados para reconocer los movimientos de la mano y luego traducirlos en comandos específicos que una máquina pueda entender. De este modo, con sólo un gesto, podríamos hacer que dicha máquina ejecute una tarea específica o una secuencia de acciones.

La comunicación entre máquinas es fundamental en entornos industriales modernos, como las fábricas avanzadas (inteligentes), donde es importante que todo funcione de manera precisa y coordinada para garantizar la eficiencia y la productividad. El desafío radica en que cada máquina se comunica con

su propio lenguaje (protocolo de comunicación), que puede variar considerablemente, creando así barreras significativas para la integración automática. Para superar estos obstáculos, existen protocolos de comunicación avanzados como el MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), que facilita que los dispositivos y máquinas se comuniquen entre sí de manera inalámbrica a través de mensajes. MQTT funciona con una arquitectura que incluye una computadora principal (conocida como servidor) a la que llamaremos *broker* y varios dispositivos conocidos como clientes. Los mensajes entre los clientes se agrupan en categorías específicas llamadas "tópicos", y cada mensaje está relacionado con una acción específica. El *broker* actúa como intermediario central que gestiona la transmisión de mensajes entre los clientes. Los clientes pueden enviar o recibir mensajes en ciertos "tópicos". De esta manera, cuando un cliente envía un mensaje en un "tópico", el *broker* se encarga de reenviar el mensaje a todos los clientes.

Redes neuronales artificiales

En el amplio espectro de la industria 4.0, las redes neuronales artificiales (RNA) se destacan por su capacidad de imitar la manera en que el cerebro humano procesa información, lo que les permite realizar tareas complejas de reconocimiento de patrones y toma de decisiones. Existen diferentes tipos de redes neuronales, algunas más complejas que otras. Una RNA puede recibir datos de una amplia variedad de sensores como: cámaras, temperatura, humedad, movimiento y muchos otros. Los datos que estos sensores generan son procesados por "neuronas" artificiales, las cuales son un modelo matemático inspirado en las neuronas del cerebro humano. Su función es recibir datos, procesarlos mediante operaciones matemáticas simples, y generar una salida que puede ser usada para tomar decisiones. Al conjunto de neuronas se les conoce como capas, las cuales son capaces de reconocer tendencias (patrones). Por ejemplo, una RNA puede ser entrenada para que, a partir de la información que transmite el Tap Strap 2, sea capaz de reconocer gestos de la mano. Para que una RNA pueda dar respuestas más precisas, es impor-



tante usar una gran cantidad de datos mientras se le enseña cómo resolver un problema.

Caso de estudio: interfaz humano-robot

En el Laboratorio Nacional de Investigación en Tecnologías Digitales (LANITED), alojado dentro de las instalaciones del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) en Querétaro, se desarrollan tecnologías innovadoras asociadas a la industria 4.0. Uno de los proyectos insignia del LANITED es el desarrollo de una celda de manufactura de placas de circuito impreso (conocidas como PCB por sus siglas en inglés), que son placas utilizadas para conectar y soportar componentes electrónicos.

La celda de manufactura tiene tres robots colaborativos (conocidos como cobots) que se encargan de transportar la placa a lo largo de toda la línea de ensamble. Estos robots están diseñados para trabajar colaborativamente con humanos, por lo que son más seguros en comparación con los robots industriales tradicionales. También se compone de

diferentes estaciones, que pueden ser desde estantes (o racks) donde se coloca la materia prima (placas de cobre), hasta maquinaria que se encarga de realizar las diferentes etapas de fabricación de las PCB, como el grabado de pistas, colocación de pasta de soldadura, colocación de componentes sobre la superficie de la placa y la fijación permanente de éstos mediante el calentamiento a altas temperaturas (la **Figura 1** esquematiza la celda y lo antes explicado).

Tradicionalmente, todos los componentes que integran una celda de manufactura son manipulados por medio de una serie de instrucciones programadas previamente por un técnico. Como alternativa al control tradicional, se propone un sistema ciberfísico basado en el uso de un dispositivo Tap Strap 2 para establecer una interfaz (interacción) humano-robot por medio del reconocimiento de gestos de la mano.

El desarrollo de este sistema ciberfísico se realizó en cinco fases. Primero, se definió un “diccionario de gestos”, cada uno vinculado a una acción específica dentro de la celda. Posteriormente, se realizaron

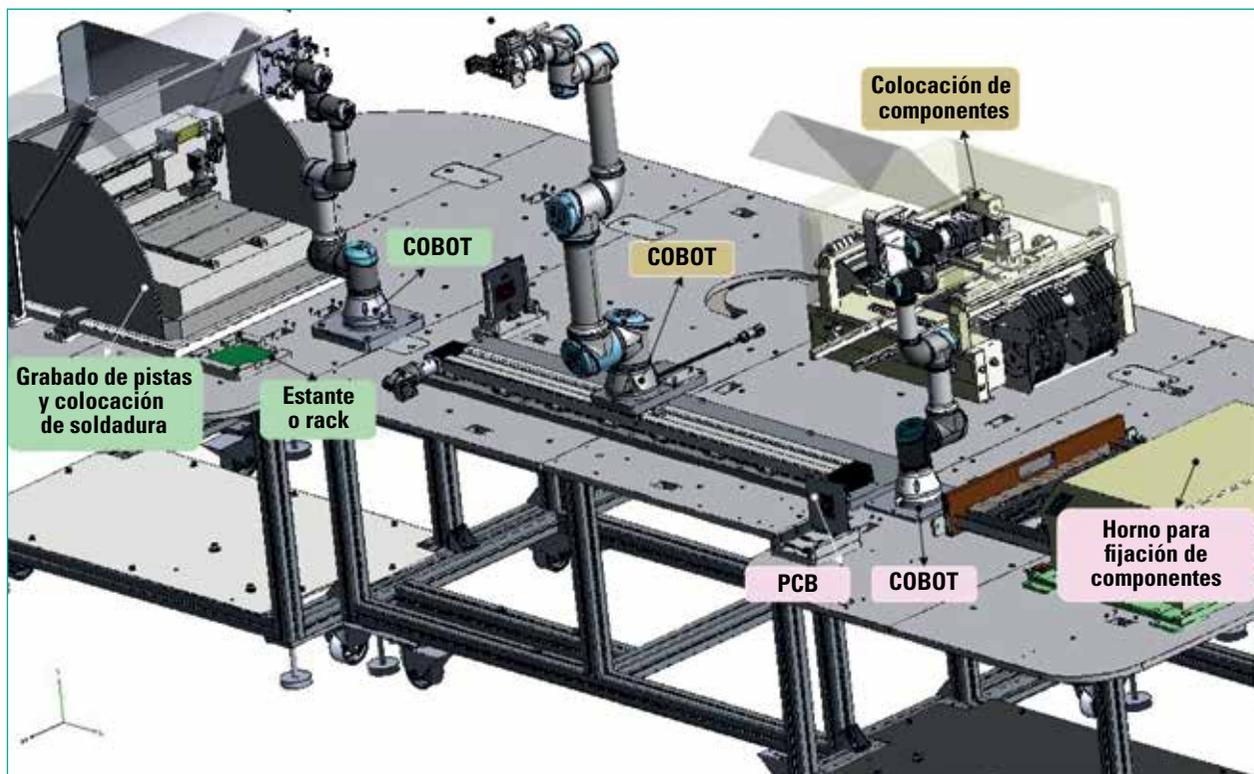


Figura 1. Celda de manufactura de PCB instalada en LANITED. Imagen elaborada por los autores.

Receptor bluetooth
Tecnología inalámbrica para la recepción de datos a corta distancia.

RSSI
Received Signal Strength Indicator, medida de la potencia de una señal recibida.

Frecuencia
Número de repeticiones de un evento por unidad de tiempo.

Archivo txt
Archivo de texto plano sin formato especial.

pruebas experimentales para conocer la calidad de la señal del dispositivo Tap Strap 2. A continuación, se adquirieron los datos transmitidos por el Tap Strap 2 con un **receptor bluetooth** integrado en un dispositivo IoT. Entonces se diseñó y configuró una RNA para el reconocimiento de los gestos de la mano. Y finalmente, se definió la lógica de comunicación entre el Tap Strap 2, el dispositivo IoT, el *broker* y los componentes de la celda.

Diccionario de gestos

La estrategia para la definición del diccionario se basó en la asignación de un gesto específico para cada componente de la celda de manufactura, así como también para cada una de las acciones que éstos son capaces de realizar (mover, tomar, colocar, abrir y cerrar). Para los componentes, se asignaron gestos alusivos al orden en que participan de acuerdo con la secuencia de producción. La **Figura 2** ilustra los gestos definidos. Por ejemplo, el primer componente de la línea de producción se identifica mediante el índice extendido, mientras que el segundo componente se identifica con los dedos índice y medio extendidos. En cuanto a las acciones, cada una se asoció con un gesto que refleja el movimiento o proceso que desencadena; por ejemplo, el gesto “tomar” indica que el cobot debe tomar la PCB. Esta estrategia fue diseñada para garantizar una curva de aprendiza-

je simple para cualquier persona que interactúe con la celda de manufactura.

Caracterización de señal

Se realizaron experimentos para caracterizar la intensidad de la **potencia de la señal recibida** (RSSI) y la **frecuencia** de los datos transmitidos por el Tap Strap 2 en función de la distancia respecto al receptor. Los resultados demostraron que el dispositivo es muy estable. Esto se evidenció por la mínima variación en la intensidad de la señal y la frecuencia de transmisión de datos, incluso al incrementar la distancia entre el dispositivo y el receptor. La **Figura 3** muestra gráficamente los resultados obtenidos.

Adquisición de datos

Se desarrolló un sistema para la adquisición de los datos del Tap Strap 2 y se integró en un equipo compacto y potente (mini PC NUC), con capacidades de cómputo de alto rendimiento, configurado para trabajar como un dispositivo IoT. El sistema establece una conexión mediante *bluetooth* entre el Tap Strap 2 (transmisor) y el dispositivo IoT (receptor), recolectando 20 000 paquetes de datos, cada uno compuesto por 15 características para cada gesto. Los datos fueron almacenados en un **archivo txt**. Después se normalizaron los datos; es decir, se limitó su varia-



Figura 2. Diccionario de gestos. Imagen elaborada por los autores.

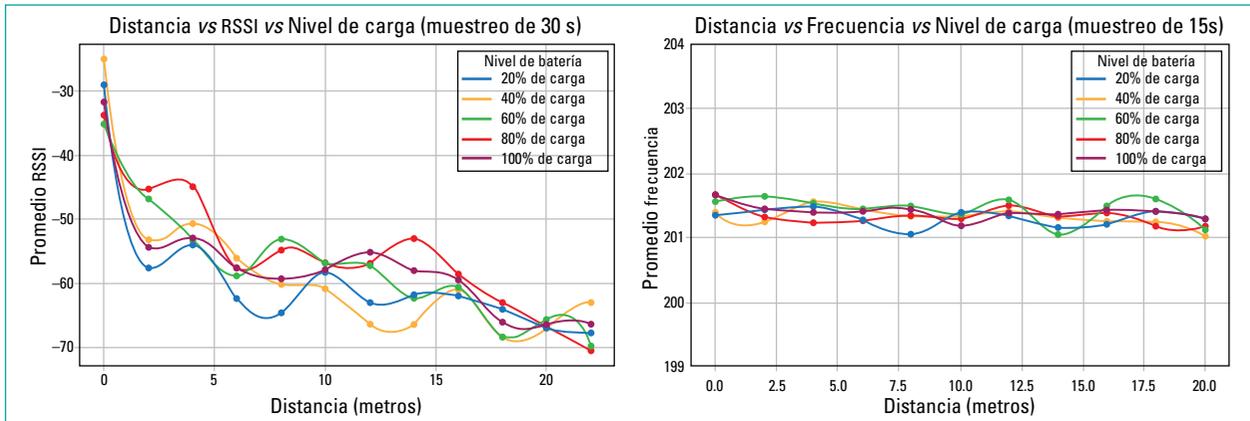


Figura 3. Intensidad de la señal y frecuencia de datos del Tap Strap 2. Gráficas elaboradas por los autores.

bilidad para que estuvieran dentro de un rango estándar entre 0 y 1. Con esto se asegura que la etapa de entrenamiento sea más rápida y precisa al acotar la escala de los datos.

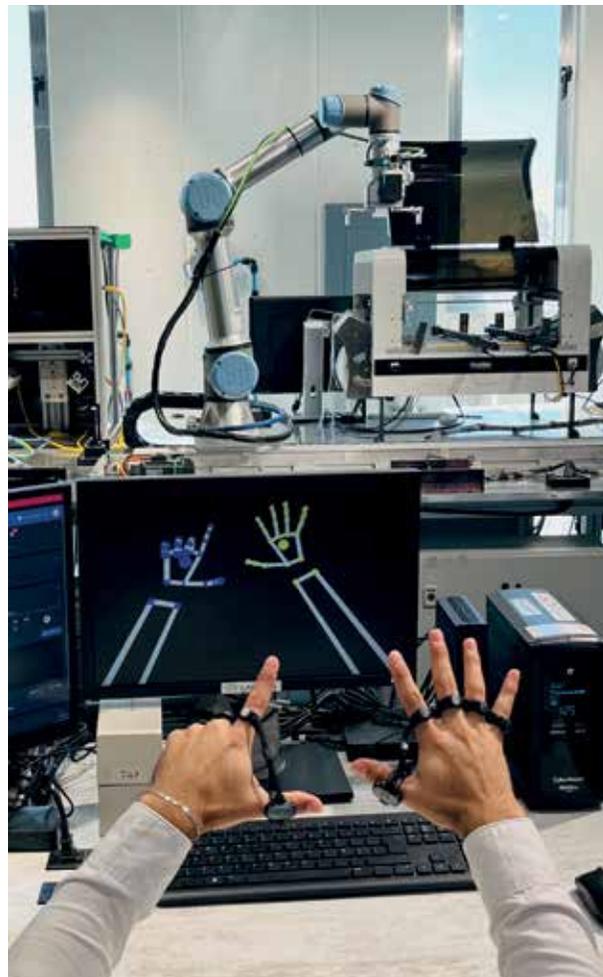
Inteligencia artificial aplicada

Se diseñó, configuró e implementó un modelo de RNA de memoria a corto-largo plazo (LSTM, por sus siglas en inglés). El modelo está diseñado con una capa de entrada, dos capas ocultas y una capa de salida. La capa de entrada recibe los datos preprocesados; las capas ocultas permiten reconocer patrones complejos en los datos (de 50 y 20 neuronas, respectivamente). Después de las capas ocultas, hay una capa de salida que clasifica cada entrada procesada en diez posibles gestos.

Inicialmente, se entrenó el modelo con tres millones de datos, de los cuales el 70% se destinó a la etapa de entrenamiento y el 30% restante se empleó para la validación de éste. El modelo LSTM alcanzó una exactitud de 0.99, lo que significa que 99% de las predicciones que el modelo hizo en los datos de validación fueron correctas. Posteriormente, se puso a prueba recibiendo datos sin procesar del Tap Strap 2 en tiempo real. De todas las veces que el modelo realizó la predicción para cada uno de los gestos definidos en el diccionario, acertó 99% de las veces.

Además, se hicieron ajustes para que las lecturas del Tap Strap 2 se adaptaran a cada usuario, teniendo en cuenta características como la forma de

su mano o la manera en que realiza los gestos. Este proceso, llamado corrección por factores, estabiliza la precisión del reconocimiento cuando el usuario que realiza un gesto no es la misma persona con la que se entrenó el modelo.



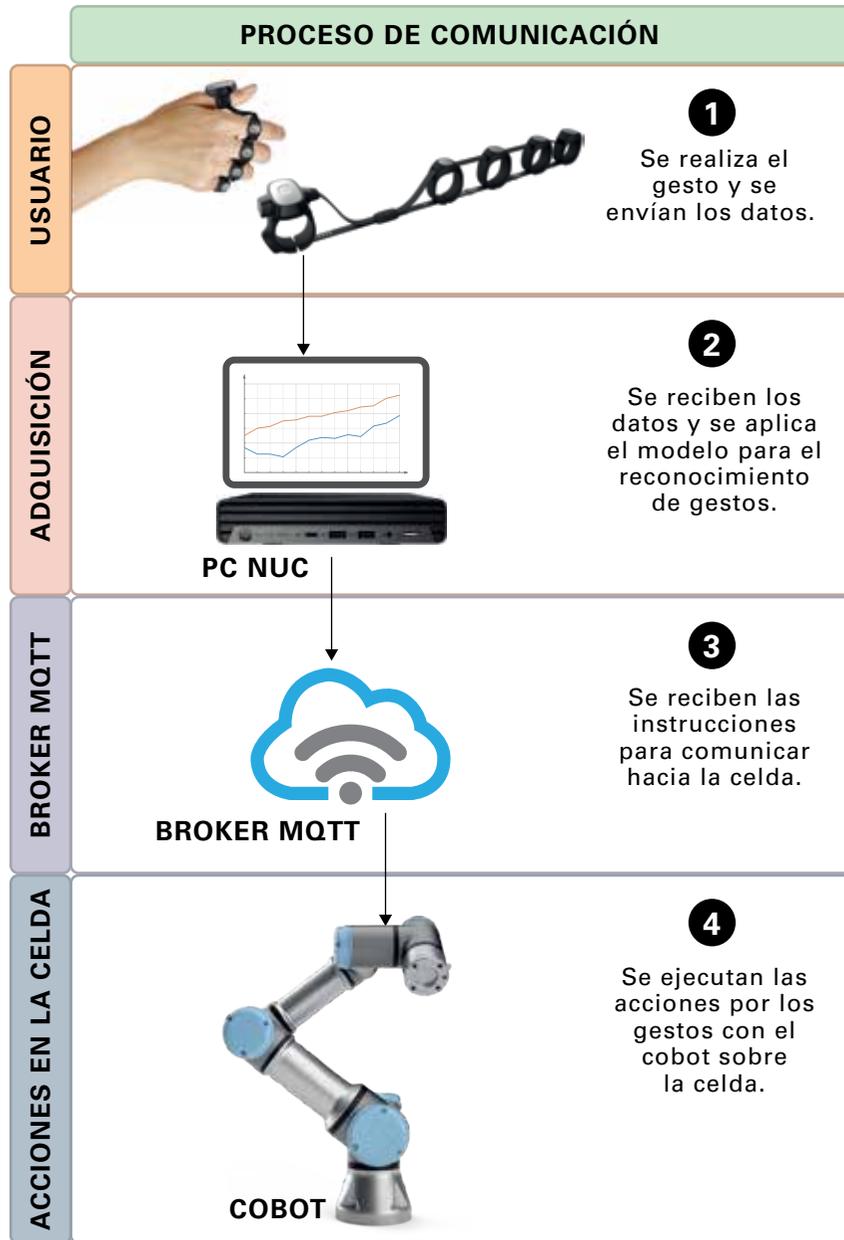


Figura 4. Diagrama de comunicación control gestual-celda de manufactura. Elaborado por los autores.

Comunicación

Una vez que el modelo de red neuronal fue implementado para clasificar gestos en tiempo real, el siguiente paso consistió en vincular cada gesto con una acción dentro de la celda de manufactura. Así, cada vez que se reconoce un gesto, se ejecuta una función específica que establece una conexión con el *broker*. Esta función envía una serie de mensajes en los tópicos correspondientes y el *broker* los reenvía a una máquina o dispositivo específico. Este cliente, al

recibir los mensajes, interpreta los valores y ejecuta la acción correspondiente; por ejemplo, mover un robot a una posición determinada. La Figura 4 describe gráficamente el proceso de la comunicación, sintetizando todos los aspectos abordados en el artículo.

Conclusiones

¿Imaginas controlar tecnología con gestos de la mano? El artículo presenta el desarrollo de un sis-

tema ciberfísico innovador basado en el reconocimiento de los gestos de la mano para transformar los sistemas de producción, lo que permite a personas con ciertas discapacidades físicas manejar y controlar la maquinaria de una celda de manufactura con sólo los movimientos de la mano.

Controlar tecnología con gestos podría transformar nuestra interacción con el mundo digital y físico. Este desarrollo, basado en un sistema que combina sensores portátiles (como el Tap Strap 2), inteligencia artificial y redes IoT, permitiría, por ejemplo, que personas con movilidad reducida operen dispositivos de forma autónoma, que trabajadores manipulen maquinaria peligrosa a distancia, o que médicos controlen equipos en quirófanos sin romper la esterilidad.

Además, al simplificar el uso de tecnología mediante gestos intuitivos, se promovería la inclusión digital de niños, adultos mayores o personas no expertas, reduciría la dependencia de dispositivos físicos (contribuyendo a la sostenibilidad) y crearía entornos más seguros y eficientes en industrias y hospitales. No se trata sólo de innovación: es un avance hacia una tecnología que se adapta a las necesida-

des humanas, priorizando accesibilidad, seguridad y bienestar colectivo.

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Investigación en Tecnología Digital (LANITED) del Conahcyt y al programa Investigadores por México-Conahcyt por brindar la oportunidad de investigación a través del proyecto 730-2017. Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México (Conahcyt) con el número de subvención F003-322609 (LANITED).

Ángel Iván García Moreno

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
angel.garcia@cidesi.edu.mx

Ángel Gabriel Salinas Martínez

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
angel.salinas@cidesi.edu.mx

Heber Isidro Morales Lugo

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
heber.morales@cidesi.edu.mx

Lecturas recomendadas

Ceriani, A. (2020), “Los gestos y las máquinas en los nuevos comportamientos digitalizantes”, en M. Scarnatto y F. A. de Marziani (comps.), *Investigar en Cuerpo, Arte y Comunicación*. Disponible en: <https://www.teseopress.com/investigarencayc/chapter/los-gestos-y-las-maquinas-en-los-nuevos-comportamientos-digitalizantes/>, consultado el 30 de enero de 2025.

Mrazek, K., B. Holton, T. Klein, I. Khan, T. Ayele y T. Khan Mohd (2021), “The Tap Strap 2: Evaluating Performance of One-Handed Wearable Keyboard and Mouse”, *HCI International 2021-Late Breaking*

Papers: Multimodality, eXtended Reality, and Artificial Intelligence, pp. 82-95. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-90963-5_7, consultado el 30 de enero de 2025.

Trujillo-Romero, F. y G. García-Bautista (2021), “Reconocimiento de palabras de la Lengua de Señas Mexicana utilizando información RGB-D”, *Revista Electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica*, 10(2):1-23. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5122/512269058001/>, consultado el 30 de enero de 2025.

Juegos para el desarrollo del pensamiento computacional

El pensamiento computacional es una habilidad mental para formular y resolver problemas de cualquier ámbito ofreciendo soluciones más rápidas o eficientes. Por esta razón es necesario garantizar que todas las personas desarrollen esta habilidad desde una edad temprana, como lo hacen con las matemáticas. En este artículo presentamos algunas aplicaciones de juegos educativos para desarrollar el pensamiento computacional.

Pensamiento computacional (pc)

El pensamiento computacional implica resolver problemas, diseñar sistemas y comprender el comportamiento humano basándose en los conceptos fundamentales de la computación.

Hace casi dos décadas, Jeannette Wing popularizó el concepto de pensamiento computacional (Wing, 2010), señalando que es una habilidad fundamental que todas las personas deben desarrollar y proponiendo que los estudiantes universitarios de todas las carreras participaran en un curso donde aprendieran acerca de los modelos y métodos computacionales para resolver problemas.

La enseñanza del pc pretende capacitar a las nuevas generaciones para que adquieran la habilidad de formular problemas y desarrollar soluciones, con la suficiente claridad para que puedan ser procesadas por una computadora con el fin de delegar el trabajo repetitivo a las computadoras y obtener mejores soluciones en menos tiempo.

El pensamiento computacional desempeña un papel muy importante en nuestro desarrollo, ya que es fundamental para la resolución de problemas y la comprensión del comportamiento humano. El pc involucra diversos conceptos, entre los que destacan: abstracción, descomposición, lógica, algoritmos, reconocimiento de patrones y evaluación sistemática.

La abstracción es el proceso de crear algo sencillo a partir de algo complicado, dejando fuera los detalles irrelevantes, mediante la búsqueda de los elementos fundamentales y separando los detalles concretos; por ejemplo, podemos usar



un modelo del Sistema Solar para representar a los planetas y sus órbitas. Por otra parte, la descomposición es el proceso de dividir un problema en partes con el fin de solucionarlo más fácilmente, y quizá en menos tiempo con la colaboración de varios equipos de trabajo. Los algoritmos describen paso a paso, específicamente y sin ambigüedades, las instrucciones para llevar a cabo un proceso. Para crear algoritmos es necesario usar la lógica (razonamiento lógico) con el fin de detallar y explicar qué se espera que suceda ante ciertas circunstancias o valores. Nuestro entorno está rodeado de patrones; reconocerlos nos permitirá hacer predicciones, clasificar elementos, crear reglas, etc. El propósito del reconocimiento de patrones es extraer información relacionada con objetos físicos o abstractos para establecer propiedades entre conjuntos de objetos, con el fin de diferenciar, asociar y clasificar los objetos. Esto implica comparar la información recibida con la información ya almacenada en el cerebro y establecer la conexión entre los recuerdos y la información percibida. Por ejemplo, conocemos muchas aves y sabemos que tienen características comunes, como plumas y pico, de modo que, si nos muestran una imagen de un animal que nunca habíamos visto, pero tiene esas mismas características, lo podemos clasificar en el grupo de las aves. Finalmente, la evaluación sistemática tiene que ver con evaluar la calidad de la solución, su efectividad para resolver el problema y la eficiencia para usar

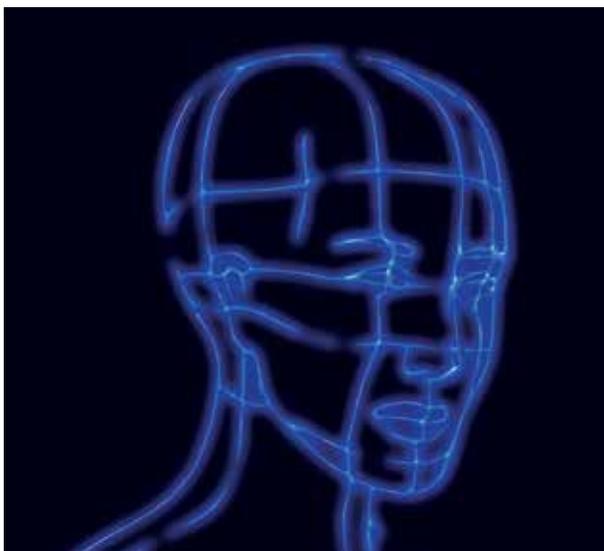
los recursos involucrados (tiempo, almacenamiento, personal, etc.). Esta evaluación determina o juzga la calidad de las soluciones y permite elegir la óptima, de acuerdo con las necesidades.

■ Ludificación

■ Los juegos son una herramienta de aprendizaje popular debido a su potencial para enseñar y reforzar conocimientos, además de desarrollar habilidades importantes como la resolución de problemas, el pensamiento crítico, la comunicación y la colaboración. Por otra parte, presentan características capaces de motivar y de enganchar a las personas durante la interacción.

Los sistemas que se usan en el ámbito educativo incorporan elementos de juego para motivar y comprometer al estudiante a alcanzar una meta o completar una tarea, con la expectativa de obtener premios o recompensas, como trofeos, medallas, puntos o posiciones en un tablero, entre otros.

La ludificación (*gamification* en inglés) de un sistema educativo consiste en usar algunos elementos de diseño de juegos, en contextos no lúdicos, con el objetivo de conseguir mejores resultados en el aprendizaje. Diversos ambientes inteligentes de aprendizaje han integrado la ludificación como una parte fundamental para mejorar la interacción con el usuario.



■ Software para el desarrollo del pensamiento computacional

■ Actualmente, el pensamiento computacional ha cobrado gran relevancia a nivel mundial ya que es fundamental para la resolución de problemas y la comprensión del comportamiento humano. Muchos países están buscando la forma de desarrollar el pensamiento computacional en las personas desde temprana edad. Incluso muchos de estos países ya han incluido temas de pensamiento computacional en su currículo de educación básica o han lanzado iniciativas para que las escuelas cuenten con herramientas para el desarrollo del pensamiento computacional a través de portales o laboratorios digitales.

Hoy en día existe una gran cantidad de aplicaciones de *software* desarrolladas para usarse en diferentes niveles educativos y en diversos contextos. En la mayoría de estas aplicaciones el objetivo es que el usuario aprenda jugando. A continuación se mencionan algunas de las más importantes en el área del PC:

- **Scratch** (<https://scratch.mit.edu/>). Fue desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) como un entorno de programación visual que utiliza bloques gráficos para la creación de programas. Scratch ha evolucionado con el tiempo y se describe como una herramienta de autor que permite la creación de historias interactivas, juegos, composiciones musicales, caricaturas y simulaciones. Una de sus grandes cualidades es la capacidad para importar y editar imágenes propias integrándolas a tu proyecto.
- **Open Roberta** (<https://lab.open-roberta.org/>). Forma parte de la iniciativa educativa alemana llamada “Roberta: aprender con robots”, donde se busca que los niños aprendan a codificar usando diversos tipos de robots, como Lego Mindstorms.

Open Roberta Lab es un entorno de programación basado en la nube que no requiere instalación local y funciona a través de un navegador web que les permite a los usuarios sin conocimientos previos programar un robot usando el lenguaje visual NEPO basado en Blockly. Además, Open Roberta Lab ofrece un entorno de simulación donde es posible visualizar las acciones del robot que fueron programadas. En la **Figura 1** se puede apreciar la interfaz de Open Roberta Lab; en la parte izquierda aparece un programa creado con bloques de instrucciones que serán ejecutadas visualizando su resultado en la parte derecha, donde se encuentra el simulador.

■ Aplicaciones de *software* para desarrollo del PC en el ITC

■ En el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán, dentro del Laboratorio de Tecnologías Avanzadas de Aprendizaje, se han desarrollado diferentes aplicaciones en el área del PC. Cada una de éstas ha sido probada y evaluada con niños y jóvenes de escuelas públicas y privadas de

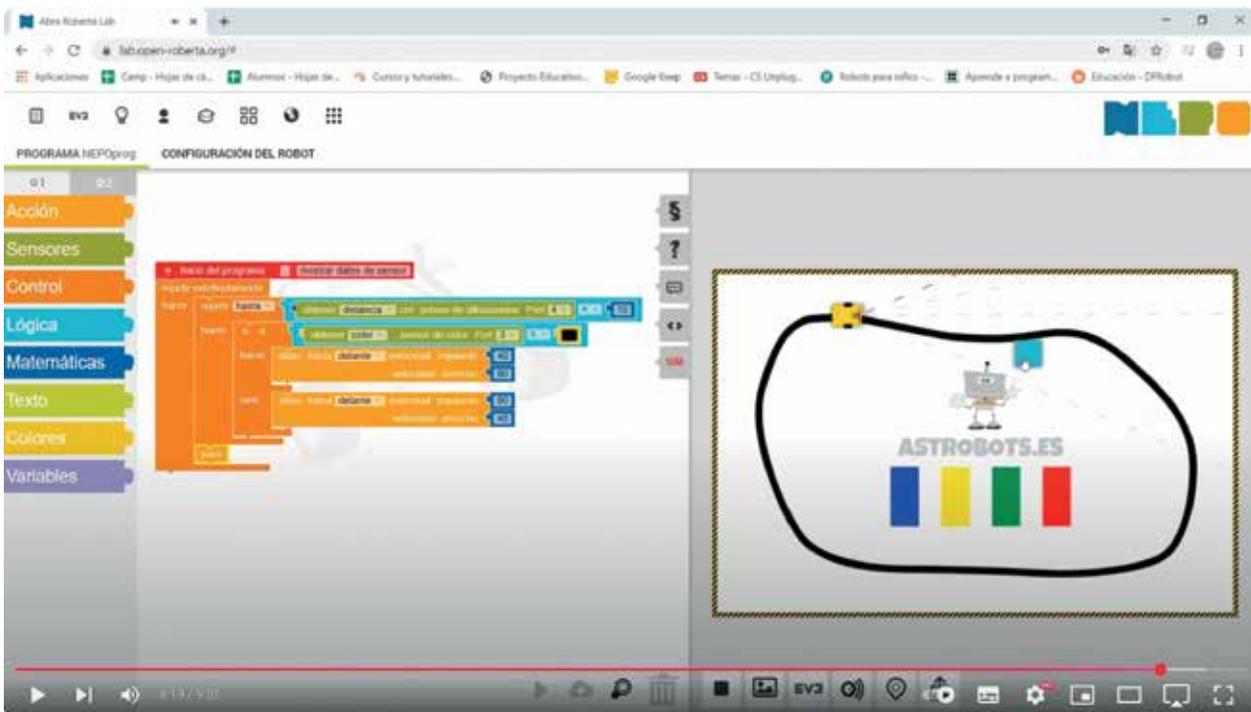


Figura 1. Interfaz de Open Roberta Lab. Crédito: Astroboots, (<https://astroboots.es/open-roberta-lab/>).

la región, y han mostrado su efectividad para desarrollar el pensamiento computacional y mantener o incrementar la motivación. A continuación presentamos algunas de ellas.

Patrony

Patrony es una aplicación para dispositivos móviles enfocada en el aprendizaje de reconocimiento de patrones, específicamente secuencias. Esta aplicación fue diseñada con referencia al currículo oficial de educación básica en México, específicamente de cuarto, quinto y sexto grado de primaria, que incluyen temas sobre reconocimiento de patrones. La **Figura 2** presenta una imagen de un ejercicio sobre secuencias de figuras geométricas.

Con Patrony, los estudiantes pueden realizar ejercicios con crecientes grados de dificultad en el reconocimiento de patrones, de una manera dinámica y divertida y obteniendo puntos cada vez que logran un acierto (véase la **Figura 3**).

La aplicación fue desarrollada para que desde un dispositivo móvil (*smartphone* o tableta) el estudiante pueda navegar fácilmente. Además, el sistema captura y almacena información del desempeño del estudiante y es capaz de generar acciones como presentar ejercicios con mayor o menor grado de dificultad, adaptando los contenidos al ritmo de aprendizaje de cada estudiante. La aplicación es dinámica, ya que genera múltiples ejercicios con diferentes ni-



Figura 2. Ejercicio sobre patrones de figuras geométricas en el libro de quinto grado, donde el niño debe seguir la secuencia de figuras y elegir la próxima figura que debe aparecer. Crédito: *Desafíos matemáticos de quinto grado. Libro para el alumno* (2014), Secretaría de Educación Pública, p. 166.

Aprendizaje afectivo
Forma de aprender que toma en cuenta emociones y sentimientos del estudiante.

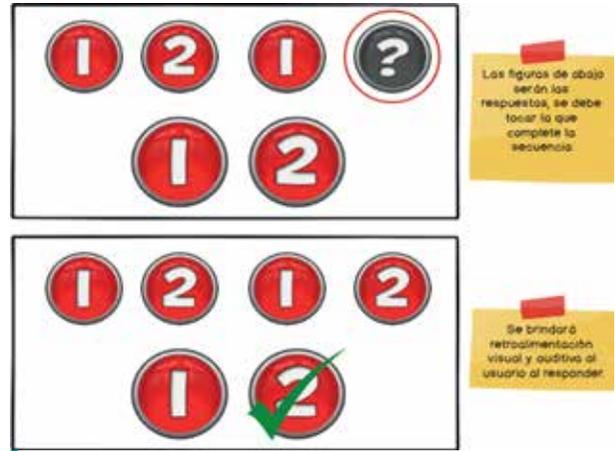


Figura 3. Ejemplo de un ejercicio en Patrony. Crédito: Romero, 2019.

veles de dificultad y contiene algunos elementos de juegos para motivar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje.

La **Figura 4** muestra la aplicación Patrony ejecutándose en diferentes dispositivos móviles. La interfaz presenta en la parte superior una secuencia de personajes que siguen un patrón (los personajes aparecen alternados) con un espacio vacío (símbolo de interrogación) para que el niño que usa la aplicación seleccione, de la lista que se muestra en la fila inferior, el personaje que debe estar en el lugar vacío. Dependiendo del nivel alcanzado por el usuario, el número de personajes en la secuencia cambia, así como el lugar donde aparece la posición vacía.

En el estudio realizado para evaluar el impacto de la aplicación Patrony en el aprendizaje de los estudiantes, se encontró que los alumnos que la utilizaron mejoraron la habilidad para reconocer patrones (secuencias) en mayor proporción que aquellos que trabajaron sólo con los ejercicios del libro de texto.

EasyLogic

EasyLogic es un ambiente de **aprendizaje afectivo** creado para que el usuario desarrolle la lógica algorítmica solucionando problemas que se describen como laberintos con personajes que deben encontrarse. En este sistema el usuario gana puntos cada vez que resuelve correctamente un ejercicio, y por cada cierto número de puntos recibe un trofeo. Ade-



Figura 4. La aplicación Patrony en diferentes dispositivos móviles. Crédito: Romero, 2019.

más, el sistema mantiene un tablero de posiciones en donde aparecen los nombres de los 10 usuarios con mayor puntaje alcanzado.

La **Figura 5** muestra una interfaz de EasyLogic que corresponde a un ejercicio de estructura repetitiva; en la parte derecha se presenta el problema por resolver, un laberinto donde el personaje Mario debe ejecutar los pasos necesarios para llegar adonde se encuentra la princesa Peach. En la parte izquierda se observa el algoritmo creado con bloques de Blockly que, con una sola **instrucción de repetición condicional**, que contiene una instrucción simple (*avanzar*), resuelve el problema. Al ejecutar el algoritmo, el personaje Mario realiza las acciones que se visualizan en el laberinto de la parte derecha.



Figura 5. Ejemplo de una interfaz de EasyLogic. Crédito: Zatarain, 2018.

Existen dos versiones de EasyLogic: una versión contiene los elementos de ludificación (puntos, trofeos y tablero de posiciones) y utiliza una red neuronal artificial que fue previamente entrenada para reconocer emociones del usuario mediante imágenes del rostro que se capturan con la cámara del dispositivo; la otra versión no tiene elementos de ludificación ni reconocimiento de emociones.

Se realizaron estudios con las dos versiones para evaluar el aprendizaje de los estudiantes y los datos estadísticos mostraron que tanto el aprendizaje como la motivación son mejores en aquellos estudiantes que usaron la versión ludificada y con reconocimiento de emociones, en comparación con los estudiantes que usaron la versión simple.

■ ■ ■ **Dinoblock**

Dinoblock es una aplicación móvil multijuegos desarrollada para dispositivos Android, diseñada para que un estudiante desarrolle a través de juegos la lógica algorítmica. Dinoblock utiliza diferentes técnicas de inteligencia artificial; por ejemplo, la lógica difusa permite personalizar el aprendizaje para el estudiante, mientras que el aprendizaje de máquina se usa para reconocer las emociones del estudiante. La herramienta permite crear algoritmos de una manera fácil y divertida usando un lenguaje de bloques.

La aplicación también incluye mecánicas de juego con el propósito de disminuir el abandono de la

Instrucción de repetición condicional

Aquella que permite ejecutar ciertas acciones todas las veces que la evaluación de la expresión condicional arroje un valor verdadero.

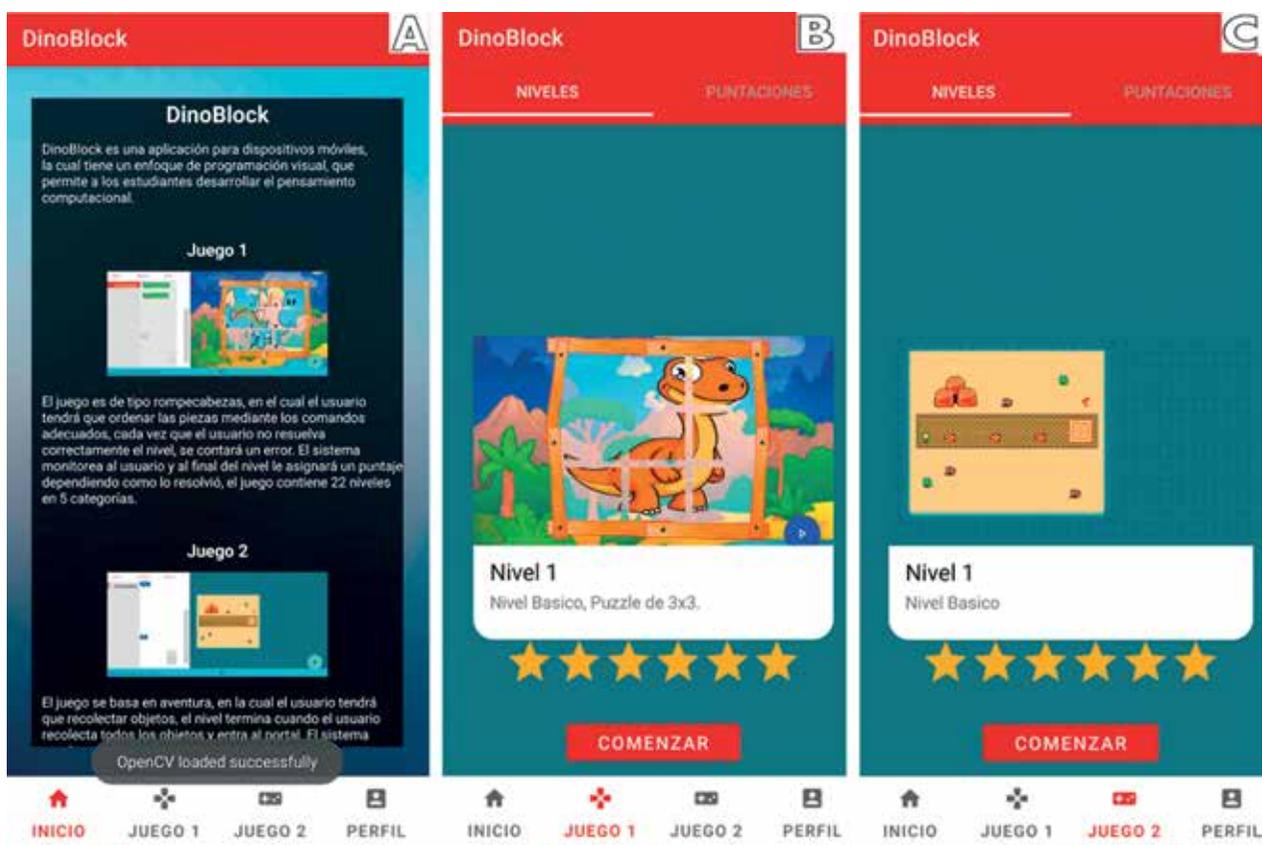


Figura 6. Interfaces de Dinoblock. Crédito: Cabrera, 2020.

actividad e incrementar la motivación para finalizar las actividades.

La aplicación consta de dos tipos de juegos para que los estudiantes puedan seleccionar entre una variedad de niveles en cada juego. La Figura 6 muestra tres interfaces de Dinoblock: A) inicio con descripción de juegos, B) juego tipo rompecabezas, C) juego tipo aventura.

El primer juego está basado en un tipo de rompecabezas, en el cual el estudiante debe acomodar correctamente las diferentes piezas utilizando bloques de instrucciones. El segundo juego se basa en uno de tipo aventura, donde el estudiante debe recolectar objetos para poder abrir un portal y avanzar al siguiente nivel.

En un estudio para evaluar las emociones de los estudiantes que interactuaron con Dinoblock se encontró que las emociones predominantes durante el juego fueron de compromiso y emoción; es decir, mostraron emociones positivas, lo cual indica

que los estudiantes encuentran que la aplicación es atractiva e interesante para interactuar con ella.

Conclusiones

La ludificación de los sistemas se ha usado con mucho éxito en diferentes sectores, no sólo en la educación, pues sirve para incrementar la motivación y el compromiso del usuario.

La aplicación de la ludificación en la educación es un campo de investigación en proceso de maduración y promete resultados importantes por la capacidad que ha mostrado para motivar y captar la atención de los estudiantes, lo que puede derivar en un incremento en el aprendizaje. A través de la enseñanza lúdica, además de interiorizar el conocimiento, los estudiantes pueden desarrollar habilidades muy importantes. Usar los juegos educativos como estrategia de aprendizaje genera un impacto positivo en la adquisición de conocimientos, en

la comprensión del contenido y la motivación del estudiante.

Por otra parte, Wing (2010) explica que el pensamiento computacional abarca diversos aspectos, como usar varios niveles de abstracción para conceptualizar (no programar), pensar como seres humanos (no como computadoras) para solucionar problemas, combinar y complementar el pensamiento matemático con la ingeniería para crear mundos virtuales más allá del mundo físico, y plantear ideas, no sólo artefactos.

Se han realizado estudios exploratorios que han demostrado que los estudiantes que participan en actividades para desarrollar el pensamiento computacional han adquirido o mejorado sus habilidades en la solución de problemas, aun cuando su disciplina no sea la computación.

Incorporar la enseñanza del pensamiento computacional como estrategia educativa nacional permitiría elevar el nivel académico de los estudiantes en los diferentes niveles, así como brindar más oportunidades de desarrollo.

María Lucía Barrón Estrada

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán.
Lucia.be@culiacan.tecnm.mx

Lecturas recomendadas

Gaitán, V. (2013), “Gamificación: el aprendizaje divertido”, *Educativa* [en línea]. Disponible en: <https://www.educativa.com/blog-articulos/gamificacion-el-aprendizaje-divertido/#:~:text=La%20Ludificaci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,concretas%2C%20entre%20otros%20muchos%20objetivos>, consultado el 3 de febrero de 2025.

Ruiz, C. (2023), “Programación y robótica en secundaria”, *Librería Catedu* [en línea]. Disponible en: <https://libros.catedu.es/books/programacion-y-robotica-en-secundaria/chapter/1-introduccion-al-pensamiento-computacional>, consultado el 3 de febrero de 2025.

Zapotecatl, J. L. (2018), *Introducción al pensamiento computacional: conceptos básicos para todos*, México, Academia Mexicana de Computación. Disponible en: <https://www.amexcomp.mx/media/publicaciones/intro-pensamiento-computacional-conceptos.pdf>, consultado el 3 de febrero de 2025.

Zatarain Cabada, R. (2018), “Reconocimiento afectivo y ludificación aplicados al aprendizaje de lógica algorítmica y programación”, *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 20(3):115. Disponible en: <https://doi.org/10.24320/redie.2018.20.3.1636>, consultado el 3 de febrero de 2025.

Referencias específicas

Cabrera Rubio, U. U. (2020), “Dinoblock: una aplicación móvil para el pensamiento computacional”, tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán.

Romero Polo, J. A. (2019), *Una herramienta inteligente y gamificada para el desarrollo del pensamiento computacional a través del reconocimiento de patrones*, tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Culiacán. Disponible en: <https://www.culiacan.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/07/Tesis-Jorge-Abraham-Romero.pdf>, consultado el 3 de febrero de 2025.

Wing, J. M. (2010), “Computational Thinking: What and Why?”, *The Link*, Carnegie Mellon University, School of Computer Science. Disponible en: <https://www.cs.cmu.edu/~CompThink/resources/TheLinkWing.pdf>, consultado el 3 de febrero de 2025.

El cómputo afectivo como experiencia artística

El cómputo afectivo desarrolla sistemas que interpretan y emulan emociones humanas para crear interfaces más empáticas. Mi obra artística explora estas capacidades mientras cuestiona las implicaciones éticas de sistemas que toman decisiones según señales emocionales como los gestos faciales o sonoros. En este artículo, presento piezas y técnicas que abordan el concepto desde la inteligencia artificial.

Introducción

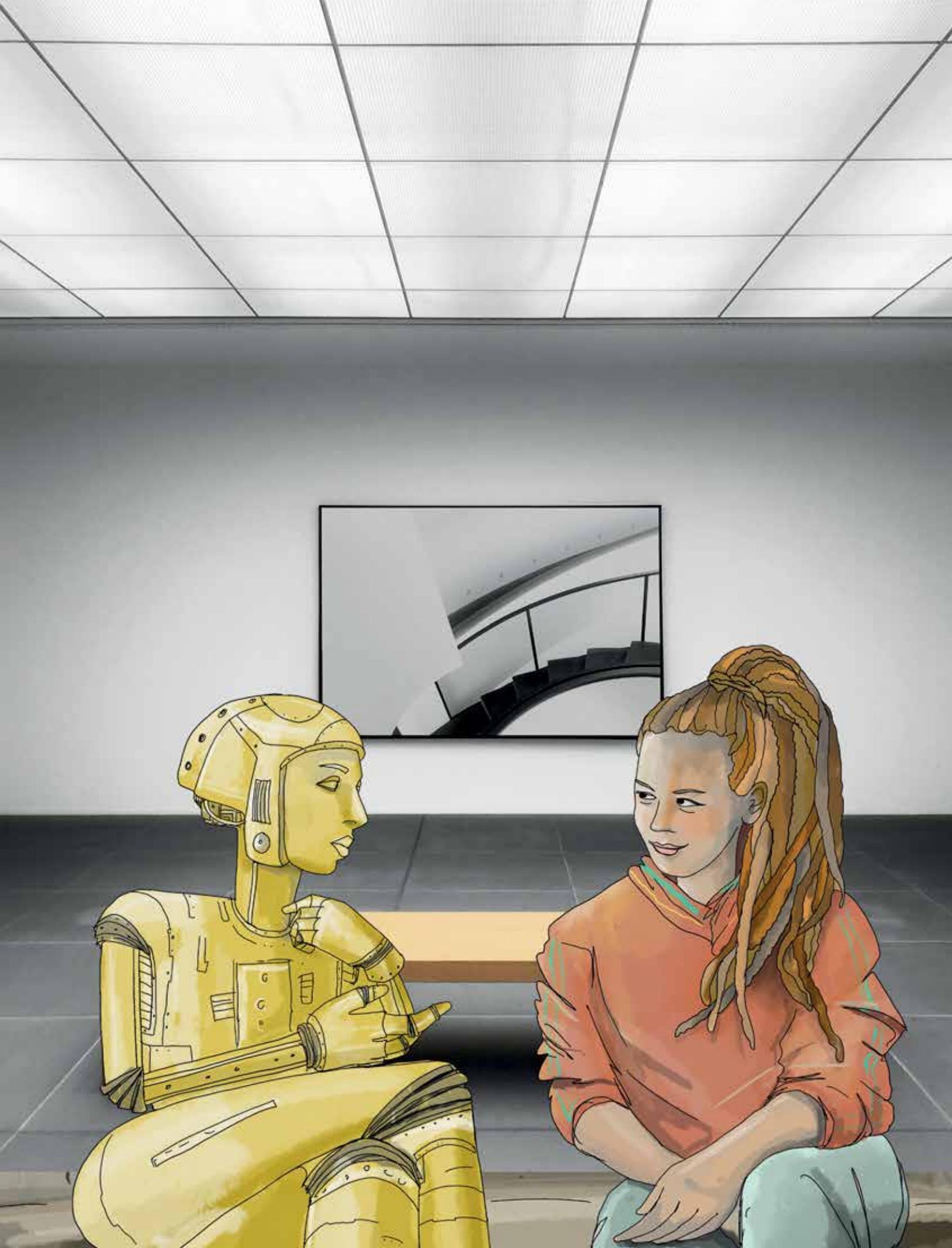
Al ser parte de una generación que vivió la transición de los medios analógicos a los digitales, a lo largo de mi carrera como artista he desarrollado un profundo interés en crear obras que exploren los vínculos entre los humanos y las máquinas. No fue sino hasta hace pocos años que estas prácticas creativas, cuyas piezas aprovechan herramientas tecnológicas, tuvieron reconocimiento de las instituciones de arte contemporáneo en México. Y esto se debe, desde mi perspectiva, principalmente al auge de la inteligencia artificial aplicada a la creación de imágenes y a la popularización de los **NFT**, que transformaron la comercialización del arte digital.

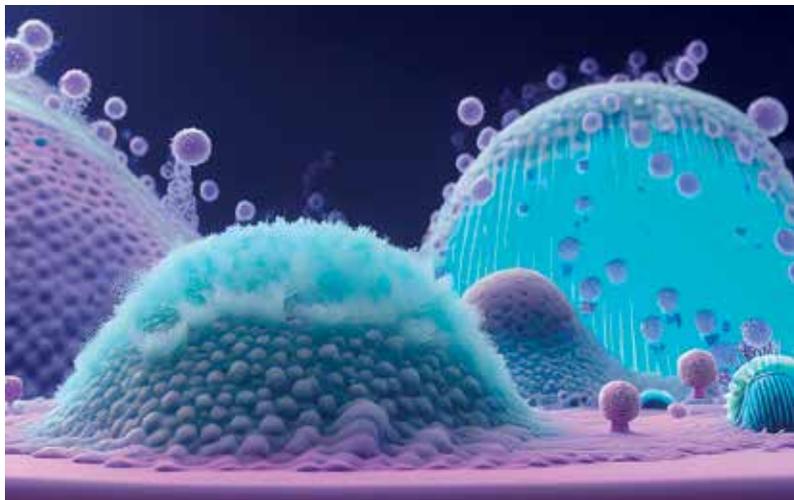
Me considero parte de una segunda generación de artistas electrónicos que exploran las posibilidades de desarrollar sus propios sistemas, tanto de *hardware* como de *software*, como parte integral de sus obras. A partir de la conexión entre arte, ciencia y tecnología busqué, con mis primeras piezas, entablar relaciones entre la experiencia humana, el discurso artístico y el diseño de narraciones interactivas no lineales, mediadas por sistemas digitales autónomos e interfaces electrónicas.

Con la aparición del primer *smartphone* en 2006 y la rápida evolución de los componentes electrónicos, comenzaron a surgir especulaciones sobre el (muy cercano) futuro impacto de las tecnologías digitales en la vida humana. Mi exploración artística se enfocó en cómo evolucionaría la comunicación interpersonal y con entes no humanos, y la manera en que esto impactaría emocionalmente en sus usuarios y, a la larga, en toda la sociedad. Las piezas que describiré en este texto tienen el objetivo común de haber sido configuradas como interfaces

NFT

Del inglés, *Non Fungible Token*, son valores simbólicos en medios digitales que se utilizan para representar la propiedad de objetos únicos.





Anni Garza Lau, *Databiota 1*.

lúdicas en las que el público experimentaba, a través de distintos estímulos, la interacción con sistemas autónomos que apelaban a sus respuestas emocionales. En varias de mis piezas estos sistemas están basados en modelos de inteligencia artificial, y en otras utilizo estas técnicas y tecnologías directamente. Las piezas que describo tienen en común la mediación de una máquina o el diálogo con la misma y las emociones del público. Dichas piezas reflejan la evolución de mi práctica artística del cómputo afectivo a la inteligencia artificial emocional.

■ **Vínculos afectivos: conexiones entre arte y cómputo**

■ Aunque posiblemente la forma en que apreciamos el arte no se ha modificado demasiado en el último siglo, la sobreexposición a dispositivos digitales con interfaces diseñadas para ser intuitivas y lúdicas, así como el gran volumen de información al que tenemos acceso a través de ellos, ha normalizado y exacerbado la producción de respuestas emocionales al interactuar con objetos discursivos.¹

En mi práctica aprovecho herramientas fabricadas esencialmente para el consumo comercial y me las apropio, desconfigurando y reconfigurando su

¹ Desde imágenes, memes, videos cortos y noticias, hasta productos audiovisuales creados enteramente con inteligencia artificial.

sentido, para construir un discurso propio. Al mezclar los posibles usos y conexiones de dichas herramientas con mis propias ideas y narrativas, surgen experiencias y objetos fuera de lo cotidiano. Como parte de mi investigación artística, uno de los paradigmas que continuamente he explorado con esta metodología es el cómputo afectivo (Picard, 1997).

El cómputo afectivo, o más recientemente llamado inteligencia emocional artificial,² es la rama de las ciencias computacionales que se ocupa del estudio y desarrollo de sistemas que puedan interpretar y emular afectos humanos, mayormente con el propósito de generar empatía en sus usuarios y crear interfaces más naturales para la comunicación entre humanos y máquinas. El término se originó en un artículo de 1995 de Rosalind Picard como parte de una investigación interdisciplinaria entre computación, psicología y ciencias cognitivas en el Massachusetts Institute of Technology. Propone que las máquinas deben ser capaces de reconocer el estado emocional de sus usuarios y modificar sus respuestas para simular empatía. A continuación describo tres piezas en las que utilicé técnicas de inteligencia artificial y que tenían este mismo objetivo, pero como parte de un discurso y experiencia artística e interactiva.

■ ***The Drama Manager*: narración interactiva y agentes**

■ En su libro *On Interactive Storytelling* (2004), Chris Crawford, afamado diseñador de videojuegos, postula la premisa de que la calidad de la interacción en una narración lúdica depende de la cantidad de decisiones en el juego que se les permite tomar a los jugadores y las consecuencias que sus elecciones tienen sobre la forma en que la historia se despliega. Propone que un *gestor de narrativas* o *drama manager* sería capaz de unir eventos de la trama de manera flexible utilizando un narrador digital.

The Drama Manager (2009) fue una obra digital e interactiva que surgió no sólo de mi idea de construir

² Esto debido a que ahora se utilizan, por ejemplo, redes neuronales para procesar patrones en gestos que pueden interpretarse como emociones.

una narración no lineal, sino de encontrar formas en las que los usuarios se relacionaran afectivamente con un personaje (una mujer animada a partir de un video mío en el jardín de mi abuela), teniendo que explorar, a partir de la propia interfaz, sus distintas formas del habla y gestos sonoros, para provocar respuestas emocionales en el personaje, y a la vez reflexionar sobre cómo se sentían al agredir, adular o seducir a un ente virtual (véase la **Figura 1**). La pieza se presentó en Cuadro, salón de artistas emergentes en el Centro Cultural Estación Indianilla, como una proyección en la que transcurría una animación de distintos paisajes. La protagonista, animada con rotoscopia, paseaba o esperaba pacientemente a que alguien llegara a interactuar con ella, mientras en la esquina izquierda de la pantalla se mostraba, a manera de lo que ahora parecería un *emoji* o *avatar* personalizado, su estado emocional actual. El público se paraba frente a un micrófono y podía producir cualquier sonido (hablar, cantar, gritar, aplaudir, besar, etc.) para comenzar a interactuar.

Para reconocer los patrones en la voz o los sonidos que pueden ser emitidos por el cuerpo, realicé una serie de grabaciones con distintas voces y organicé las pausas, volumen y frecuencias que se repetían al generar cierto tipo de conversación, emitir sonidos guturales o hacer ruidos con la boca y las manos. De esta manera, el programa detectaba cuándo iniciaba una frase y analizaba la duración de cada sonido antes de una pausa. Al producirse un silencio más largo, interpretaba que la intervención había finalizado y calculaba qué tipo de gesto sonoro se había producido.

En colaboración con José Luis García Nava, diseñamos un mapa de emociones para el personaje (véase la **Figura 2**), que contenía círculos distribuidos en cierto espacio dividido por tipos de emociones básicas y complejas, los cuales crecían dependiendo del tipo de estímulo sonoro. Cada círculo tenía un tamaño máximo diferente, para establecer inclinaciones en el carácter del personaje, y aumentaba o disminuía su tamaño dependiendo del tipo de estímulo sonoro detectado en cada momento. Por ejemplo, el círculo de la ira crecía cuando el público le gritaba al personaje. Los círculos, dentro o cerca



Figura 1. Interfaz de *The Drama Manager*. Imagen facilitada por la artista.

de una emoción, actuaban como atractores para un vehículo que representaba la emoción actual. La fuerza de atracción era directamente determinada por el tamaño del círculo. Dependiendo de en qué

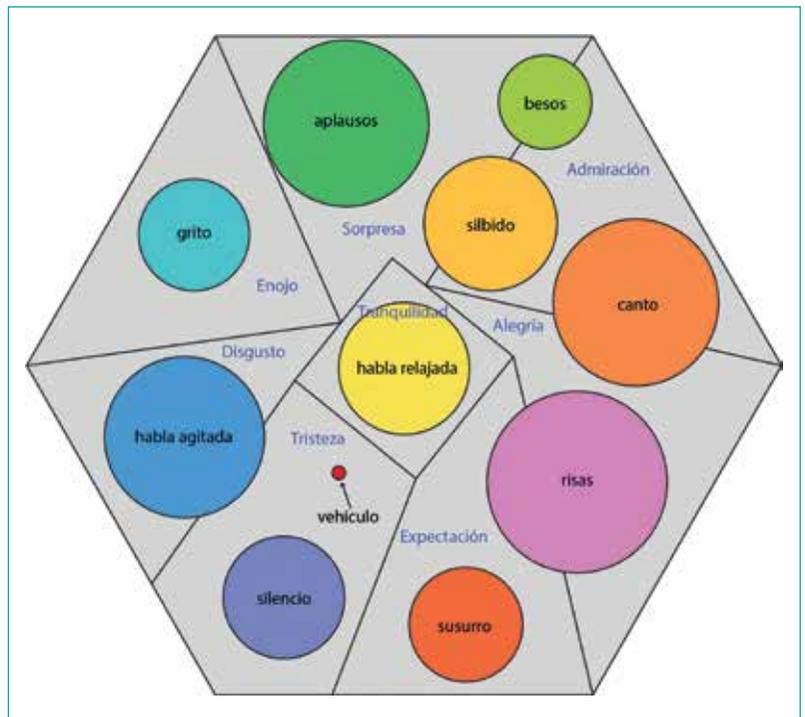


Figura 2. Mapa afectivo en la pieza, basado en la rueda de emociones de Plutchik. Imagen facilitada por la artista.

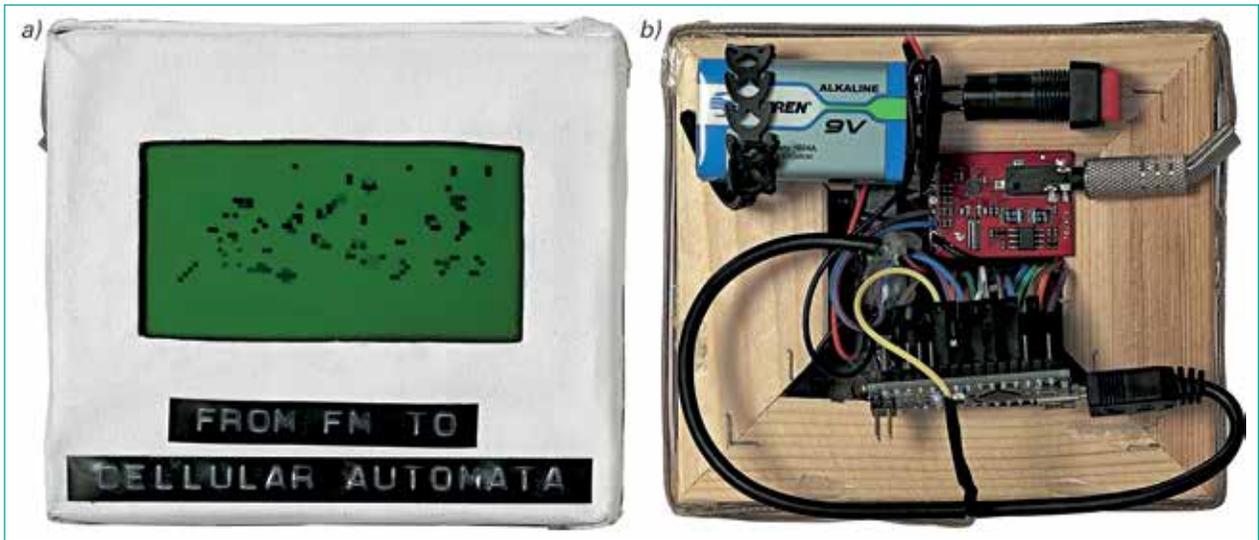


Figura 3. Registro de *From FM to Cellular Automata*. Imágenes facilitadas por la artista.

parte del mapa emocional se encontraba el vehículo, se representaba el estado del personaje, y éste a su vez tomaba decisiones en la narración dependiendo de cómo se “sentía”.

En inteligencia artificial, un agente es una entidad capaz de percibir su entorno, generalmente a través de sensores (en este caso un micrófono), y generar respuestas o tomar decisiones en tiempo real. La respuesta o salida del sistema de la pieza consistía en una segunda capa de decisiones: dependiendo del punto en el que se encontrara en la historia, un cambio emocional podía dirigir la narrativa hacia una nueva línea, aunque pasaba en ocasiones que los estímulos interpretados no eran suficientes para avanzar en la historia y se producían bucles repetitivos de acciones o incluso la falta de acción.

Los autómatas celulares y el romance

En 2014 fui invitada a realizar una obra en formato pequeño para la Colección Imago Mundi, organizada mundialmente por Luciano Benetton. La colección y el catálogo se llamaron “Mexico: the future is unwritten”.³ Las piezas creadas en lienzos idénticos de 10 × 12 cm se presentaron en Venecia ese mismo año. Al ser un formato tan pequeño, uno de los ma-

yores retos fue pensar en una pieza electrónica que fuera visual y funcionara en relación con el tema del futuro. En gran medida mis propias experiencias en Venecia determinaron que la pieza se conectara con esa ciudad en particular.

From FM to Cellular Automata (2014) fue la pieza resultante de este ejercicio (Figura 3): el lienzo contenía una minipantalla LCD (pantalla de cristal líquido) monocromática en la que los píxeles eran visiblemente grandes, aparentando una cuadrícula en la que imaginé alguna forma de vida sintética. Como parte de mi interés en producir arte generativo, decidí utilizar autómatas celulares para que habitaran de manera activa la pieza. Me basé en el *Juego de la vida* de Conway,⁴ sabiendo que distribuir de manera aleatoria a mis “células vivas” finalmente terminaría por dejar la pantalla vacía, incluí en el circuito (que trabajé en colaboración con el ingeniero electrónico Roberto Garza) una antena de radio que interpretaba las frecuencias de la música de una estación de radio particular de Venecia, que sólo emitía canciones románticas. Dependiendo de las frecuencias de cada canción, nuevas células vivas se agregaban aleatoriamente a la cuadrícula del

⁴ El *Juego de la vida* alude a un autómata celular diseñado por el matemático John Horton Conway en 1970. El juego no tiene jugadores y su evolución se determina por un estado inicial sin requerir ninguna intervención adicional.

³ “México: el futuro no está escrito”.

Pantallas LCD (Liquid Crystal Display)

Usan cristales líquidos y una luz de fondo para mostrar imágenes. Son eficientes en energía y comunes en televisores, monitores y dispositivos móviles, pero tienen menor contraste que las OLED.

autómata, asegurándose de que la población nunca se extinguiera.

Los autómatas celulares son modelos matemáticos que representan sistemas dinámicos que evolucionan en pasos. Sus reglas determinan los estados de vivo o muerto de unidades o células en una cuadrícula, y pueden ser bastante sencillas. El *Juego de la vida*, por ejemplo, sólo tiene tres reglas de proximidad que se aplican simultáneamente en cada paso y a cada célula. A pesar de la aparente simplicidad de este sistema, la actualización simultánea (computación en paralelo) y su interacción local (sólo interactúan con las ocho celdas que están a su alrededor), producen interrelaciones que se complejizan rápidamente y a menudo ocurren “comportamientos emergentes”. Aunque el *Juego de la vida* por sí mismo no se considera parte del *reconocimiento de patrones* (una rama de la IA), las simulaciones hechas a partir de autómatas celulares se utilizan a menudo para simular y encontrar patrones en sistemas naturales. Los comportamientos, como la autoorganización, jerarquización o cooperación, que surgen entre los elementos dentro de estos sistemas, pueden verse a su vez como una forma de inteligencia colectiva emergente.

■ Interfaces, identidad y redes neuronales

■ Entre 2019 y 2022 la doctora Lilianha Domínguez y yo exploramos las posibilidades de transmitir, guardar y modificar información identitaria en ADN. El proyecto, nombrado *Selección antinatural*, exploró la idea de **cómputo biológico**, como una forma de mantener información potencialmente sensible en medios que no fueran digitales y al mismo tiempo cuestionar qué es la identidad humana en el contexto de una era digital en la que los sesgos producidos por el reconocimiento facial y otras tecnologías vinculadas a la IA determinan la gobernanza en las sociedades del mundo actual. Como parte del proyecto, extrajimos secuencias de nuestro ADN y las insertamos en plásmidos dentro de bacterias. Posteriormente produjo, con varias técnicas de inteligencia artificial, una pieza digital que continuaba estos cuestionamientos. *Interfaces de la identidad* (2021) se



Anni Garza Lau, *Databiota 2*.

presentó como parte de la exposición conmemorativa del décimo aniversario del Centro de Cultura Digital en la Ciudad de México.

Aunque se trata de una instalación producida por computadora, la pieza utiliza información proveniente de nuestras observaciones al replicar secuencias de ADN humano en bacterias, así como de las mutaciones que sufrieron. En *Interfaces de la identidad*, el espectador se acercaba a un libro, *Un mundo feliz*, de Aldous Huxley, iluminado por una lámpara de lectura (véase la **Figura 4**). Una cámara web capturaba el rostro del visitante y tomaba una foto para ser analizada por un programa escrito en **Python**, que concluía género, etnia, edad y estado emocional de los usuarios. Posteriormente, la pieza mostraba en una proyección la imagen capturada, en la cual los píxeles perdían su orden poco a poco, junto con los resultados del reconocimiento facial y una porción de texto generado por una red neuronal alimentada con los resultados del análisis. En este texto se reconstruía cada vez un fragmento del libro de Huxley y era simultáneamente leído por una voz artificial.

Las diversas capas que se interrelacionan en el sistema de la pieza contraponen la visión actual, forense y política del ADN como conductor de información biológica, con la visión distópica de Huxley, siendo el usuario el objeto de escrutinio para cuestionar los sesgos y cuantificación de la identidad en la era digital. Si bien el reconocimiento de rostro tuvo

Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel, diseñado para ser legible y cercano al lenguaje natural; su versatilidad lo ha convertido en un estándar en web, automatización, IA y ciencia de datos.

Cómputo biológico

Alude al uso de biotecnologías para almacenar información y realizar procesos computacionales a través de estructuras orgánicas como el ADN, a partir de ciertas condiciones (o entornos).



Figura 4. Montaje de *Interfaces de la identidad* en el Centro de Cultura Digital en CDMX. Izq. dibujos de iris y huella digital de la artista (datos biométricos) hechos con bacterias que replican su ADN. Imagen facilitada por la artista.

sus inicios en las décadas de 1960 y 1970, esta área de investigación se consolidó en 1988, con base en la propuesta de Sirovich y Kirby sobre el método de análisis de componentes principales (PCA).⁵ Sobre decir que aunque muchas de las implementaciones para el reconocimiento de rostro sirven para generar avances en educación y salud, en otros casos implican una vigilancia ubicua, usos comerciales como publicidad e incluso el robo de identidad a través de

Deep fakes ▶ *deep fakes.*

Son videos o clips de audio generados por inteligencia artificial que hacen parecer que alguien está diciendo o haciendo algo que nunca hizo; pueden utilizarse para difamar a personas y cometer fraudes.

Además del reconocimiento de emociones y rasgos personales utilizados para generar una corta narración, la pieza emula el crecimiento bacteriano portador de ADN, utilizando los píxeles de la imagen capturada para crear una simulación en la que los colores funcionan como colonias o agentes que hacen una conversión de aminoácidos (A, C, G, T)⁶ a colo-

res (R, G, B, A)⁷. Para la reescritura de una porción del libro *Un mundo feliz*, se utilizó una red neuronal en lenguaje Python y la biblioteca Keras, que fue entrenada durante aproximadamente tres horas con el texto completo del libro. Las redes neuronales recurrentes (RNN) utilizan datos secuenciales (en este caso enunciados), y se distinguen por su “memoria”, ya que obtienen información de entradas anteriores para influir en la entrada y salida actuales. En la pieza existía cierta probabilidad de que una palabra estuviera seguida por otras en particular de acuerdo al entrenamiento. Si bien los enunciados producidos no eran idénticos a los del libro —quizás ni siquiera enteramente legibles en la gramática correcta del español—, la lectura del público los dotaba a menudo de una interpretación que los visitantes tomaban como personal.

Para la lectura realizada por una voz artificial, se entrenó una red neuronal en Python, usando la biblioteca Tacotron2. Grabé y transcribí aproximadamente dos horas y media de audio con mi propia voz, leyendo frases recomendadas para entrenamiento

⁵ Es un tipo de algoritmo para biometría. La técnica estadística utiliza una transformación ortogonal para convertir un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables linealmente no correlacionadas.

⁶ Adenina, citocina, guanina y timina, las cuatro bases nitrogenadas que conforman el ADN.

⁷ Rojo, verde, azul y alfa son los canales de color y transparencia que determinan la apariencia de cada pixel en las pantallas.

de redes neuronales en español, que abarcaran la mayor cantidad de sonidos posibles. La red se entrenó durante 15 horas y sonoramente el resultado fue bastante similar a mis lecturas originales. El *texto a voz* (text-to-speech: TTS, según sus siglas en inglés) es una técnica que consiste en generar un habla que suene natural a partir de una entrada de texto. El motor TTS convierte el texto escrito en una representación fonética y luego convierte ésta en ondas que pueden emitirse como sonido.

Nota final

 Si bien las redes neuronales se han popularizado y su uso extendido en los últimos años gracias a herramientas como Google Colab o la rápida evolución de los procesadores gráficos (GPU, por sus siglas en inglés), existen otras técnicas y métodos en el ámbito de la inteligencia artificial que vale la pena explorar, en particular desde el punto de vista del arte, como herramientas en la creación de piezas que cuestionan el papel de la tecnología en la realidad actual. Debido a sus características generativas, la mezcla de disciplinas, técnicas y narrativas, estos

cruces han promovido, como es mi caso, el desarrollo de piezas e instalaciones que funcionan como sistemas complejos y multidimensionales tanto técnica como conceptualmente.

Anni Garza Lau

Artista visual, Centro Nacional de las Artes.
contacto@annigarzalau.com

Lecturas recomendadas

Canazas, A. P., J. J. Ramos Blaz, P. D. Torres Martínez y X. Jaquehua Mamani (2022), “Sistema de identificación de emociones a través de reconocimiento facial utilizando inteligencia artificial”, *Revista Innovación y Software*, 3(2):140-150.

Jasso, K. y D. Garza Usabiaga (eds.) (2020), *(Ready) media: Hacia una arqueología de los medios y la invención en México*, México, Laboratorio Arte Alameda/Instituto Nacional de Bellas Artes.

Referencias específicas

Crawford, C. (2004), *On Interactive Storytelling*, EUA, New Riders.

Picard, R. (1997), *Affective Computing*, EUA, MIT Press.

Problemas y riesgos de la inteligencia artificial, y legislación para atenderlos

Los avances recientes de la inteligencia artificial (IA) generativa (como ChatGPT) son impresionantes. Se expresan con naturalidad y sentido común en español u otros idiomas, responden preguntas habladas o escritas, tienen gran imaginación y vasto conocimiento. Empero, son herramientas deficientes y peligrosas. Inventan respuestas que parecen razonables y revuelven lo cierto con sus mentiras (“alucinaciones”).

Urge que los gobiernos regulen a la IA. Hablaré del camino que ha tomado la Unión Europea promulgando recientemente la Ley de IA. Conviene que México haga lo mismo.

Los avances de la IA y sus riesgos

La inteligencia artificial es una rama de la computación. Crea algoritmos y sistemas que presentan (o pretenden presentar) las mismas capacidades que el ser humano. Por ejemplo:

- sistemas que piensan como seres humanos (toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje [se autocorrigen]);
- sistemas que actúan como humanos (robots que desarrollan tareas que hacen las personas);
- y otros que piensan racionalmente (emulan el pensamiento lógico racional de los seres humanos [sistemas expertos]), perciben (entienden imágenes, texto, conversaciones, sonidos), razonan y actúan en consecuencia (agentes inteligentes, demuestran sentido común).

Una rama de la IA, llamada IA generativa, usa grandes modelos de lenguaje para producir respuestas a preguntas y conversaciones en lenguaje natural. Entre sus desarrollos recientes se encuentran:





- DeepSeek, de la empresa china DeepSeek;
- ChatGPT, el chatbot basado en GPT3;
- GPT3, generador preentrenado, basado en transformadores [redes neuronales avanzadas], creador: OpenAI;
- GPT4, la versión comercial de GPT3, OpenAI;
- Gemma, Bard, y su versión nueva Gemini, Google;
- Llama2, Meta;
- Claude, Antropic;
- Mistral o Mixtral, Mistral AI;
- Github Copilot, útil para generar programas de cómputo, Alex Graveley;
- Copilot X, útil para generar programas de cómputo, basado en GPT4.

El estado actual de la IA hace que estas herramientas sean muy útiles y eficaces para desarrollar muchas de las tareas y problemas enunciados, por lo que su uso aumenta constantemente. Sin embargo, su comercialización y explotación debe tomar en cuenta los riesgos y problemas que pueden provocar si se trata de *software* defectuoso, mal probado, puesto apresuradamente en el mercado para “ser los primeros”. Soltar al mercado herramientas deficientes es parecido a comercializar medicinas sin probar, sin

aprobación oficial por parte del gobierno. Se trata a los usuarios como conejillos de Indias. El gobierno debe regular su uso, de acuerdo con el daño que provocan.

Toda herramienta o medicina tiene ciertos riesgos; si éstos son menores en comparación con las ventajas que proporcionan, se comercializan con pequeñas restricciones, como la enunciación —en un inserto a la caja de medicinas, o en el manual de usuario del *software* en cuestión— de advertencias respecto a su empleo y problemas detectados, para propiciar un uso responsable e informado. Si el riesgo es más elevado, se toman medidas más restrictivas: “útese sólo bajo prescripción y vigilancia médica”, “para uso en situaciones de emergencia”, etc. Las herramientas y medicinas con más alto riesgo deben estar mucho más restringidas, o francamente prohibidas. Su uso es ilegal y conlleva penas.

En lo que sigue tomaré como ejemplo una herramienta moderna de IA, el de ChatGPT, analizando sus ventajas, usos y deficiencias. Al final esbozaré la legislación reguladora promulgada recientemente por la Unión Europea, la Ley de IA. La idea es que el gobierno mexicano adopte una ley parecida, que nos proteja de los riesgos de la IA defectuosa.

¿Cómo trabaja ChatGPT?

ChatGPT es un nuevo y poderoso chatbot de IA que usa un modelo de lenguaje diseñado para producir lenguaje humano bastante natural. Este ejemplo de tecnología de IA generativa se centra en comprender y analizar texto. Es más preciso que los algoritmos de aprendizaje automático tradicionales, porque puede comprender las complejidades del lenguaje natural. Al igual que al tener una conversación con alguien, usted puede hablar con ChatGPT y éste recordará las cosas que ha dicho en el pasado y, al mismo tiempo, podrá corregirse cuando lo desafíen. Usa GPT3, su transformador preentrenado generativo (una red neuronal artificial gigantesca), que utiliza algoritmos especializados para encontrar patrones dentro de las secuencias de datos, así como un modelo de aprendizaje automático. GPT4, la versión comercial de GPT3, se entrenó con cien millo-



nes de millones de palabras, tomadas de Wikipedia, de internet, de libros... Las fuentes exactas se desconocen.

ChatGPT conoce la sintaxis, no genera frases como “las perro comen carne”; conoce la semántica, no genera frases como “los perros comen polinomios”; tiene y usa bastante información obtenida de varias fuentes; tiene buen sentido común, no genera frases como “los perros comen 100 kilos de carne cada día”. Mucho de lo que responde concuerda con la información en internet, pero también inventa respuestas que parecen razonables, y revuelve lo cierto con sus mentiras (“alucinaciones”, falsedades) (Guzmán, 2023).

Es de uso muy generalizado y lo será aún más; véase en la página 90 el apartado **Gran uso**.

Peligros de ChatGPT

Genera respuestas incorrectas. Si bien es excelente para explicar conceptos complejos, lo que lo convierte en una herramienta poderosa para el aprendizaje, es importante no creer todo lo que dice. ChatGPT no siempre es correcto, al menos no todavía. Cuando responde, no se da cuenta de si lo dicho es correcto, es una aproximación razonable, o es incorrecto.

Tiene sesgo. Exhibe los mismos prejuicios aprendidos de la escritura colectiva de las personas en todo el mundo.

Algunos ejemplos de riesgos del ChatGPT son:

- Consejo médico incorrecto.
- Estafadores que se hacen pasar por conocidos. Más *phishing* en correos.
- Difusión de información falsa. Intensa contaminación de internet con mentiras e inexactitudes emitidas por la aplicación.
- Su distribución es gratuita, sin regulación.
- Dado que su arquitectura es confidencial, sólo se conocen generalidades de los datos con los que fue entrenado.
- Reemplaza trabajos que requieren poco esfuerzo intelectual:
 - codificadores, programadores informáticos;
 - asistentes legales;
 - agentes de servicio al cliente;
 - investigación de mercados;
 - programadores de citas;
 - asesores financieros;
 - correctores de estilo.
- Reemplaza trabajos que requieren gran imaginación, debido a su inclinación a inventar respuestas

Phishing
Uso de mensajes falsos o sitios web que fingen ser legítimos, con el fin de robar información confidencial del usuario.

Gamificación

El arte de hacer juegos con el propósito de enseñar algo distinto a lo que se juega; aprender jugando.

“creativas”, aunque a menudo incorrectas, fuera del sentido común:

- redactor de novelas;
- creador de guiones para películas;
- diseñador de juegos;
- diseñador de anuncios;
- creador de frases pegajosas.¹

La difusión de información falsa también es una preocupación seria. La escala a la que ChatGPT puede producir texto, junto con la capacidad de hacer que incluso la información incorrecta suene convincentemente correcta, sin duda hará que la información en internet sea aún más cuestionable. Es decir, si muchos usuarios de ChatGPT deciden poner en internet los resultados de sus consultas, internet se contaminará aún más con mentiras y noticias falsas: antes sólo los humanos las emitíamos; ahora ChatGPT también (Guzmán, 2023).

Hay demasiadas formas en que se puede abusar de estos sistemas. Se distribuyen gratuitamente y no existe una revisión o regulación para evitar daños. Piense en un virus que anda suelto, que tiene muchos beneficios, pero también peligros y daños ocultos (Loizos, 2022).

Gran uso

Las empresas están ansiosas de explotar la IA generativa para ofrecer productos y servicios especializados, al mejorar los productos actuales. Esperan una gran bonanza económica. Quizá exagerarán las bondades de sus productos y minimizarán sus problemas, no obstante los peligros que ya he mencionado. Se está empleando en:

■ **Educación:**

- aprendizaje personalizado;
- enseñanza de idiomas;
- asistencia en la escritura;
- en la investigación;
- en enseñanza virtual;
- preparación de exámenes;

¹ Sugerencia: úsese, pero desconfíe de sus respuestas, verifique, dude. “No creas todo lo que te dijeren”.

- redacción de reportes y tareas escolares;
- **gamificación**;
- conversaciones con personajes históricos.

■ **Negocios:**

- entrenamiento;
- productividad;
- generación automática de preguntas, respuestas, evaluaciones y cuestionarios;
- optimización de la cadena de suministro;
- mercadotecnia.

■ **Finanzas:**

- análisis financieros y asesoramiento;
- atención al cliente;
- procesamiento de documentos, préstamos, etc.;
- detección de fraudes;
- gestión de inversiones y de riesgos.

■ **Medicina (Pranoy, 2016):**

- *Del diagnóstico al descubrimiento: investigación médica.* Estas herramientas, por su avanzado procesamiento del lenguaje, pueden comprender e interpretar información médica. Es posible analizar a una persona por medio de sus exámenes de laboratorio, radiografías, electro-



cardiogramas... Tareas: análisis de datos; generación de hipótesis; medicina personalizada. Ventaja: mayor precisión.

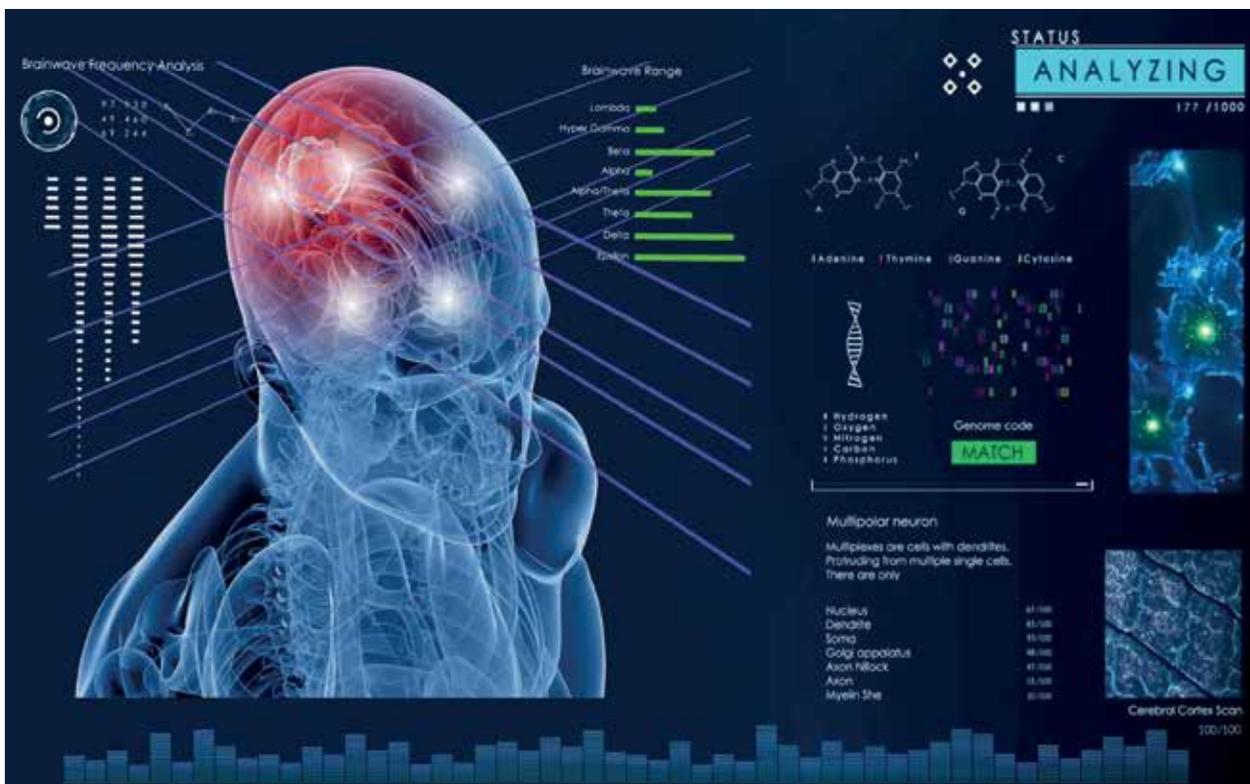
- **Descubrimiento de medicamentos.** La capacidad de GPT3 para analizar la información de la literatura científica y otras fuentes (por ejemplo, al escanear grandes cantidades de información) puede ayudar al descubrimiento de nuevos objetivos farmacológicos, al identificar patrones y establecer conexiones que podrían no aparecer de inmediato para los investigadores humanos.
- **Diseño de ensayos clínicos.** GPT3 puede ayudar a mejorar el diseño.
- **Desarrollo de fármacos.** Al ser capaz GPT3 de predecir estructuras y propiedades moleculares, puede utilizarse en el desarrollo de fármacos para generar compuestos químicos sintéticos. Además, al predecir los perfiles farmacocinéticos y de toxicidad, las aplicaciones de GPT3 en la atención médica pueden ayudar a mejorar la formulación de medicamentos y los regímenes de dosificación, e identificar po-

sibles efectos adversos antes de que comiencen los ensayos clínicos. Por tanto, puede ayudar a mejorar la seguridad y eficacia de nuevos medicamentos, para aumentar las posibilidades de éxito en el desarrollo de fármacos.

El uso de estas aplicaciones se acentuará con la aparición de DeepSeek, aplicación gratuita, de código abierto (cualquier persona puede obtener, descargar, revisar y modificar su programa de cómputo), cuyo poder y servicios son comparables con ChatGPT.

■ **Legislación necesaria para controlar sus riesgos**

■ Se requiere en México una ley parecida a la Ley de IA de la UE (Comisión Europea, 2024). Esta ley (“reglamento”) introduce un enfoque basado en el riesgo, donde la severidad de las reglas corresponde al daño potencial que los sistemas de IA pueden causar a la sociedad. Cubre varios aspectos, incluidas las definiciones y el alcance, la clasificación de los sistemas de IA como de alto riesgo, las prácticas de IA prohibidas, las excepciones para la aplicación de la





Arquitectura de gobernanza

Forma en que un país estructura y conduce su gobierno.

ley y la **arquitectura de gobernanza**. La legislación describe una capa horizontal de protección clasificando los sistemas de IA en función del riesgo, con reglas estrictas para los modelos de alto impacto que pueden plantear riesgos sistémicos (Consejo de la Unión Europea, 2023).

Las principales características de esta importante legislación europea son:

- Objetivo: garantizar la seguridad de los sistemas de IA en uso. Evitar la agresión a los valores fundamentales y los derechos humanos.
- Legislación basada en riesgos. La severidad de las reglas depende del daño potencial que los sistemas puedan causar a la sociedad.
- Define la IA y clasifica a los sistemas de ésta según su riesgo, de la siguiente manera:
 - **Sistemas prohibidos:**
 - Manipulación cognitiva-conductual.

- Reconocimiento de emociones en lugares de trabajo e instituciones educativas.
- Puntuación social basada en comportamiento, estado económico-social, características personales.
- *Software* policial de identificación biométrica en tiempo real.
- *Software* policial predictivo para evaluar el riesgo de que un individuo pueda cometer delitos futuros.
- **Sistemas de alto riesgo:**
 - Dispositivos y equipo médicos.
 - Vehículos y elevadores.
 - Administración de estructuras críticas (gas, agua, electricidad, etc.).
 - Reclutamiento, manejo de recursos humanos y trabajadores.
 - Educación y orientación vocacional.
 - Influir en las elecciones y los votantes.

- Acceso a servicios (seguros, banca, crédito, beneficios, etc.).
- Reconocedores de emociones.
- Identificación biométrica.
- Cumplimiento de la ley, control fronterizo, migración y asilo.
- Administración de la justicia.
- **Sistemas de propósito general.**
- **Sistemas de bajo riesgo.**
- Penalidades severas para los fabricantes, introductores o usuarios infractores.
- Periodos de gracia de seis meses a dos años.

■ **Conclusión**

■ Por su amplio empleo y riesgos, urge regular su uso, mediante leyes. Ventaja: el excelente ejemplo del Acta IA de la UE. La Academia Mexicana de Ciencias debe promover esto.

■ **Recomendaciones**

■ A los usuarios de estas herramientas avanzadas de la IA generativa:

- “No creas todo lo que te dijeron”.
- Úsalo como un buen ayudante, pero verifica, desconfía.

A los gobiernos:

- Que establezcan regulaciones sobre la comercialización de productos de IA defectuosos o mal probados, o que producen noticias falsas o engañosas y la proliferación de tales noticias.

Adolfo Guzmán Arenas

Centro de Investigación en Computación, IPN.
aguzman@ieee.org

Lecturas recomendadas

Comisión Europea (2024), “La ley de inteligencia artificial de la UE”, *EU Artificial Intelligence Act* [en línea]. Disponible en: <https://artificialintelligence.act.eu/es/>, consultado el 15 de enero de 2025.

Consejo de la Unión Europea (diciembre, 2023), “Artificial intelligence act: Council and Parliament strike a deal on the first rules for AI in the world”, comunicado de prensa, *Council of the European Union* [en línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/ComuPrensaUE>, consultado el 15 de enero de 2025.

Guzmán Arenas, A. (junio, 2023a), “ChatGPT, el nuevo y asombroso chatbot de IA”, Charlas de Martes de la Academia, Academia de Ingeniería de México [en línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=EAatAYa3_dE&t=1054s, consultado el 15 de enero de 2025.

Guzmán Arenas, A. (julio-septiembre, 2023b), “ChatGPT, el nuevo y asombroso chatbot de inteligencia artificial”, *Ciencia*, 74(3): 80-87. Disponible en: <https://tinyurl.com/Platica-Chat-Ciencia>, consultado el 15 de enero de 2025.

Loizos, C. (2022), “Is ChatGPT a ‘virus that has been released into the wild?’”, *TechCrunch* [en línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/WildVirus>, consultado el 15 de enero de 2025.

Pranoy (2016), “The impact of GPT-3 in healthcare, pharma, medical research, and diagnosis”, *Accubits Blog* [en línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/Usomedico>, consultado el 15 de enero de 2025.







Deepfakes, educación, optimización, música y diseño: la IA y los procesos computacionales en la investigación en la UAM

En este artículo se exponen cinco proyectos de investigación que, abocados al uso de procesos computacionales e inteligencia artificial en diferentes áreas, se desarrollan en la Universidad Autónoma Metropolitana, los cuales se espera que tengan un importante impacto en la sociedad y aporten en áreas en que estos procesos están revolucionando diversos campos del conocimiento y del arte.

Introducción

En los últimos años, la inteligencia artificial (IA) ha dejado de ser una mera herramienta futurista para convertirse en un componente clave en diversas áreas de la investigación científica y humanística. Los avances que ha tenido la IA están transformando la manera en que la investigación aborda problemas complejos, permitiendo realizar descubrimientos más rápidos y precisos. La capacidad de procesar grandes volúmenes de datos y de aprender de ellos ha hecho que la IA sea indispensable en el análisis de información, la clasificación de resultados y la optimización de procesos.

Las tecnologías digitales, por ejemplo, han revolucionado los procesos creativos, permitiendo explorar nuevas fronteras en el diseño y la innovación. La IA, como parte fundamental de estas tecnologías, ha encontrado múltiples aplicaciones en campos como el arte, la música y el diseño gráfico, impulsando una colaboración entre la creatividad humana y el potencial computacional. La IA no sólo optimiza la producción creativa, sino que también facilita el aprendizaje automático para mejorar aspectos como la eficiencia en la creación de contenido y la personalización de experiencias, desde el diseño de productos hasta la planificación de rutas. Por otro lado, el uso de IA ha avanzado significativamente en áreas como la detección de manipulaciones visuales y auditivas en contenido digital.

De hecho, los laboratorios de inteligencia artificial se han convertido en centros de innovación, donde se desarrollan soluciones computacionales para enfrentar desafíos complejos.

En la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) se desarrollan proyectos de investigación de vanguardia que consideran el uso de procesos computacionales y de la IA, cuyos avances demuestran cómo la IA está moldeando el futuro de la investigación y la creatividad en una variedad de disciplinas. A continuación, se expondrán cinco proyectos de diferentes áreas de la UAM que tienen un impacto importante en la sociedad.

■ **Deepfakes y clonación de voz**

■ El avance de la IA en los últimos años ha permitido el desarrollo de herramientas capaces de generar imágenes realistas, redactar textos complejos e incluso componer música. Sin embargo, también han surgido tecnologías controvertidas, como los *deepfakes* y la clonación de voz, las cuales utilizan IA para crear imitaciones altamente realistas de personas, lo que genera preocupación sobre su impacto social.

Aunque la edición de imágenes no es algo nuevo, los *deepfakes* llevan esta capacidad a otro nivel al manipular videos. Estos algoritmos permiten reemplazar el rostro de una persona real por el de otra –la persona clonada– en un video de manera casi indetectable. Los *deepfakes* utilizan IA para automatizar el proceso de sustitución de rostros, generando una falsificación tan convincente que la mayoría de las personas no puede distinguirla de un video original.

De forma similar, la clonación de voz utiliza algoritmos avanzados para replicar características vocales como tono, ritmo y acento, generando audios que parecen pronunciados por la persona clonada y que crean una ilusión de autenticidad.

La combinación de *deepfakes* y clonación de voz ofrece grandes ventajas en áreas como el cine y la publicidad. Por ejemplo, es posible rejuvenecer el rostro de una persona o incluso recrear a una persona fallecida para una película o un comercial. Sin embargo, también presentan riesgos importantes. Las personas pueden ser fácilmente engañadas por

contenidos manipulados, lo que abre la puerta a la desinformación, el fraude y la manipulación de la opinión pública. Se han utilizado en casos que dañaron la reputación de individuos o en fraudes telefónicos, donde los estafadores clonan voces para obtener dinero o información personal.

Los avances en IA son el resultado de un esfuerzo colectivo de muchas personas. Tecnologías como los *deepfakes* y la clonación de voz no sólo dependen del progreso tecnológico, como computadoras más potentes, sino también de las decisiones de quienes entrenan y perfeccionan estos algoritmos.

En el área académica de Optimización e Inteligencia Artificial del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, trabajamos en diversas líneas de investigación relacionadas con la IA. En este contexto, hemos estudiado las implicaciones de tecnologías como los *deepfakes* y la clonación de voz desde diferentes enfoques.

En el caso de los *deepfakes*, exploramos su creación mediante un proyecto de maestría que reveló que son el resultado de algoritmos que requieren grandes cantidades de imágenes de los rostros de dos personas, la real y la clonada, para aprender sus características. Estos algoritmos emplean varias horas de entrenamiento en computadoras especializadas y los resultados suelen necesitar ajustes; por ejemplo, modificar el tamaño del rostro de la persona clonada para que encaje perfectamente en el rostro de la persona real, como una máscara personalizada. El proceso es complejo, ya que implica obtener un amplio número de imágenes, recortarlas para que incluyan sólo los rostros y asegurarse de que muestren las mismas expresiones y ángulos.

Para obtener buenos resultados, las dos personas deben tener estructuras faciales similares y tonos de piel compatibles, entre otras características. Sin embargo, suelen aparecer errores, como bordes visibles de la máscara, cambios en el color de las pupilas, diferencias en el tono de piel o pixelado desigual en el rostro. A partir de estas experiencias, identificamos los errores más comunes en los *deepfakes*, aprendimos a corregirlos y mejorar los resultados. Además, consideramos que compartir esta información fomenta la

conciencia sobre estas herramientas y ayuda a estar más alerta ante videos manipulados.

Para validar nuestras observaciones, organizamos un experimento con dos grupos de personas. Uno recibió una presentación sobre los errores comunes en los *deepfakes* y las diferencias entre videos originales y manipulados. Después de algunos días, ambos grupos contestaron una encuesta para evaluar su capacidad de diferenciarlos. Los resultados mostraron que las personas que conocían los errores eran más capaces de identificar los *deepfakes*, aunque aún era posible engañarlos.

Posteriormente, iniciamos un proyecto de doctorado centrado en la clonación de voz, adoptando un enfoque basado en nuestra experiencia con los *deepfakes*. Sabíamos que la percepción humana podría ser engañada, pero también que la inteligencia artificial podía ayudarnos a detectar manipulaciones. Para ello, usamos una gran cantidad de grabaciones de voz originales y clonadas, disponibles en conjuntos de datos públicos, y diseñamos un algoritmo capaz de distinguir entre audios genuinos y falsificados.

La idea central de nuestra propuesta consistió en transformar cada archivo de audio en una representación visual y luego entrenamos algoritmos para identificar si una imagen correspondía a un audio original o a uno manipulado. Gracias a este enfoque, nuestra propuesta se posicionó entre los mejores algoritmos en esta área al identificar los audios manipulados con gran precisión.

Actualmente, hay esfuerzos constantes de diversos grupos para desarrollar algoritmos que generen *deepfakes* y clonaciones de voz más realistas, mientras que otros grupos crean algoritmos capaces de detectar, con un alto grado de efectividad, videos o audios manipulados.

Los *deepfakes* y la clonación de voz tienen un gran potencial, pero su uso irresponsable puede causar daños. Un desafío ético importante es la responsabilidad: ¿quién responde cuando un *deepfake* afecta la reputación de alguien? Además, el uso no autorizado de la imagen o voz de una persona plantea riesgos de privacidad, ya que el contenido falsificado puede engañar fácilmente y generar confusión social. A pesar de que algunos países están implementando regula-



Figura 1. Los *deepfakes* y los problemas éticos del uso de identificadores personales.

ciones más estrictas —como sanciones por suplantación de identidad o daños a la integridad—, las leyes aún no se adaptan con suficiente rapidez a la evolución de estas tecnologías.

La IA ha traído avances extraordinarios, pero tecnologías como los *deepfakes* y la clonación de voz también presentan desafíos significativos, en especial en lo referente a la posibilidad de desinformación y manipulación. Aunque se están desarrollando regulaciones, lo crucial es conocer su existencia y educar sobre sus ventajas y peligros. Esto fomentará una sociedad más crítica hacia la información que recibe y comparte, para reducir así la propagación de información falsa. El reto será equilibrar la innovación con la protección de derechos fundamentales, como la privacidad y la verdad.

 **Laboratorio de Inteligencia Artificial,
UAM Azcapotzalco: reflexión, investigación
e intervención en IA**

El Laboratorio de Inteligencia Artificial (LAIA) es producto del esfuerzo coordinado del Departamento de Administración, División de Ciencias y Humanidades y la Rectoría de la UAM Azcapotzalco, para mantener un acercamiento permanente en cuanto a los avances de la IA en diversos campos de estudio.

Su objetivo es integrar, apoyar y promover proyectos de investigación e intervención institucionales sobre la inteligencia artificial, su naturaleza, sus aplicaciones y el impacto que tiene en sectores como la educación, la salud, el gobierno, la economía, la cultura y el derecho, entre otros, desde diversos ámbitos disciplinarios, como la administración, la filosofía, la sociología, la antropología, los estudios organizacionales y la intervención en las organizaciones, por mencionar algunos.

La naturaleza ontológica que da fundamento al LAIA se encuentra en el reconocimiento explícito de que la IA es una extensión de la propia naturaleza del ser humano; es decir, podríamos denominarla una nueva filogenia que nace escindida del propio ser biológico humano, pero que es parte del mismo. De esta manera el término es sólo un accidente histórico que en su momento ayudó a vislumbrar un horizonte tecnológico desconocido, pero que hoy en día estigmatiza una posible naturaleza alterna del ser humano.

En el LAIA buscamos participar en al menos tres sentidos en el cambio paradigmático que la IA está provocando en la civilización: en primer lugar, conociendo en la aplicación misma de la tecnología su utilidad práctica y eficiencia técnica; en segundo, analizando críticamente y con perspectiva multi-

disciplinaria la forma en que su aplicación impacta organizacional y socialmente al ser humano, y por último, dirigiendo su uso hacia proyectos de impacto social con un fundamento axiológico de carácter humanista y de cuidado del ambiente.

Actualmente el LAIA y la Red Institucional de Fortalecimiento de la Economía Social y Solidaria impulsan el Programa de Inteligencia Artificial Estratégica Social y Solidaria (PIAESS), el cual tiene como objetivo apoyar microorganizaciones que estén en vulnerabilidad, como las micro y pequeñas empresas, cooperativas o profesionistas de México y América Latina, a través de la mejora de sus procesos administrativos y sociales, mediante el uso de inteligencia artificial utilizada por estudiantes de nivel superior durante un trimestre en un proceso de intervención organizacional de acompañamiento, pero que mantenga una perspectiva de carácter social, humanista y de cuidado del ambiente.

Con este proyecto se genera un impacto de al menos tres dimensiones. Por un lado, se apoya a las organizaciones más importantes que hay en los países de América Latina; nos referimos a las microempresas, ya que constituyen al menos el 95 % de las entidades económicas y aportan el 70 % del empleo en la región. En este sentido, constituyen un espacio social fundamental de la reproducción económica, además de garantizar la creación y recreación de la realidad social de millones de familias. En segundo lugar, el PIAESS constituye un ejercicio innovador de educación dual con IA al enviar al alumnado a la zona real de las microorganizaciones y ahí realizar un acto de intervención con su consecuente proceso de enseñanza-aprendizaje. Y, finalmente, se tiene un impacto de red entre la comunidad académica y social, universidad-sociedad, enfoque que está escasamente atendido.

El LAIA participa activamente en la creación de una nueva Licenciatura en IA en la UAM Azcapotzalco, que podrá ofertarse muy probablemente a finales de 2025, la cual constituye un proyecto de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI) en modalidad semipresencial y que tiene como objetivo: "Formar profesionales en el campo de la inteligencia artificial, con conocimientos teóricos y prácticos en

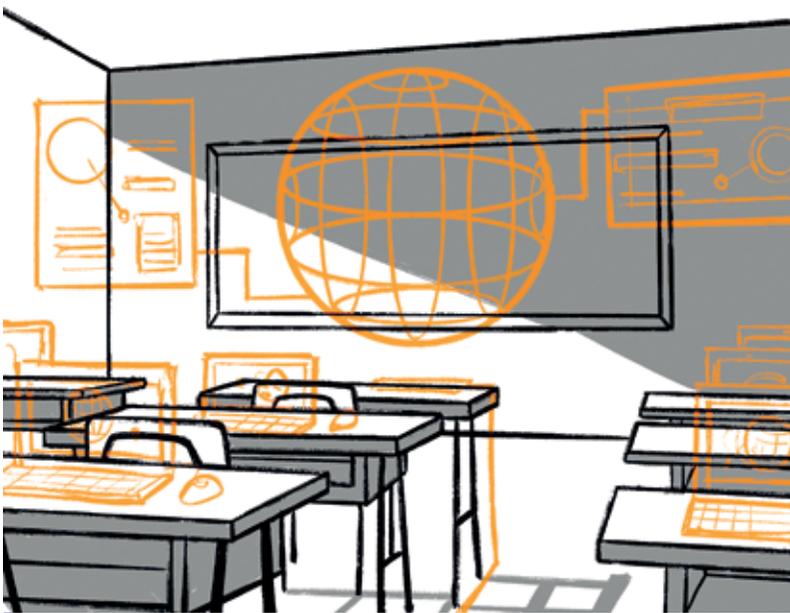


Figura 2. La inteligencia artificial en el aula potencia capacidades y mejora procesos.

disciplinas que les permitan contar con habilidades técnicas, analíticas y creativas, competentes para diseñar, desarrollar, implementar y evaluar soluciones innovadoras, éticas, responsables, sostenibles y sustentables, a partir de proyectos aplicados, con objeto de resolver problemáticas complejas en diversos ámbitos y sectores de la sociedad”. En este proyecto de la División de CBI participan también las otras dos divisiones de la Unidad, lo que constituye un espacio privilegiado que atiende una demanda de profesionales en IA con sentido social y ético. Por otra parte, la Licenciatura también permitirá mantener, en lo concerniente a metodología, una constante actualización en los temas referentes a la IA, detonando una comunidad epistémica particular que responda críticamente a los cambios tecnológicos que se están desarrollando en el mundo.

El LAIA impacta también en tres dimensiones diferentes. En principio, constituye evidentemente una estrategia permanente de difusión de las reflexiones, acciones y propuestas de la comunidad epistémica del LAIA y para ello se han publicado ya tres libros: *El futuro de la IA*, *Ética, transhumanismo y sustentabilidad en la IA* e *Inteligencia artificial en América Latina*. Asimismo, se han publicado dos números de la *Revista IA* en la Universidad y se participa en las principales redes sociales digitales, Facebook, Instagram y Tiktok, con más de 20 mil seguidores y más de 2 millones de interacciones, además de la página <https://iauama.com>. La segunda dimensión que el LAIA ofrece es el propio espacio teórico, epistémico y axiológico de reflexión de quienes participamos en él, principalmente estudiantes, que de otra manera nunca hubieran publicado o al menos hubieran tardado varios años en hacerlo. Finalmente, la tercera dimensión del LAIA es el ejercicio de reflexión teórico-epistemológica para analizar la naturaleza de los artefactos que creamos; por ejemplo, los libros que hemos publicado constituyen en sí mismos objetos de investigación, ya que fueron realizados con IA, y en el primero de los casos, entre la convocatoria, dictaminación, trabajo editorial y trámites legales de autoría, pasaron tan sólo 31 días, lo que genera todo un debate que se añade a los objetos de estudio del LAIA.

■ La IA como apoyo para el diseño adecuado de rutas vehiculares

■ El diseño de rutas vehiculares es de mucho interés tanto para usuarios particulares como para compañías de transporte. Uno podría pensar que, con nuestra experiencia, el diseño de una ruta es una tarea trivial, lo cual es cierto siempre y cuando no se diseñe para una ciudad como la de México. La Ciudad de México cuenta con vías rápidas, gratuitas y de peaje, vías primarias y secundarias, lo que nos podría facilitar mucho esta tarea. Sin embargo, dada la concentración de la población, esto se convierte en un reto.

■ Cuando uno usa aplicaciones de navegación como Waze o Google Maps, éstas generalmente emplean dos criterios principales para mostrar sus opciones: distancia y tiempo. Para ambas opciones, si es que hay tramos de peaje en las rutas, también muestran cuánto habría que pagar, pero no se considera un criterio primario. De aquí que, cuando queremos diseñar la “mejor” ruta, podríamos tomar en cuenta, además de distancia y tiempo, otras medidas de lo



■ **Figura 3.** La inteligencia artificial auxilia en la optimización de acciones y procesos diarios.

que quiere decir “mejor”; por ejemplo, costo, seguridad y comodidad, entre otras.

Encontrar la “mejor” ruta es una labor difícil debido a la cantidad de opciones que tenemos (calles, avenidas, calzadas, bulevares, rutas elevadas, autopistas urbanas, etc.) y cada una de ellas aporta cierto nivel de distancia, tiempo, costo, seguridad y comodidad a la ruta. Si una ruta es la más corta, más rápida, más barata, más segura y más cómoda, seguramente ésa es la “mejor”, aunque generalmente no es fácil encontrar una ruta así, si es que existe.

Formalmente, éste es un problema de “optimización”, porque el objetivo del problema es encontrar la solución óptima, es decir, encontrar “la mejor” ruta. Actualmente, existen muchas técnicas que nos ayudan a resolver este tipo de problemas; sin embargo, la eficacia de dichas técnicas depende en gran medida de la cantidad de posibles opciones para formar una ruta.

Un problema de optimización es difícil porque, para encontrar la solución que mejor lo resuelva, es preciso evaluar computacionalmente todas las alternativas para saber cuál de ellas es la mejor. Esto es considerablemente costoso en términos de tiempo de cómputo, aun cuando tuviéramos acceso a las supercomputadoras más modernas y sofisticadas del planeta.

Afortunadamente, también existen otros métodos que, a pesar de que no garantizan encontrar las mejores soluciones a problemas de optimización, sí logran proponer opciones buenas que cumplen con ciertos criterios de calidad. Por ejemplo, si al trazar una ruta vehicular de un punto a otro queremos hacer no más de una hora, cualquier solución que ponga menos de 60 minutos será buena.

Por otro lado, ¿cuántas veces hemos usado Waze o Google Maps para trasladarnos de un lugar a otro en un vehículo y, de repente, el tiempo faltante no se reduce, sino aumenta? Esta situación se debe principalmente al incremento de tráfico en las zonas o en los segmentos de la ruta que faltan por recorrer, y este comportamiento no debería ser ajeno. Es más, las aplicaciones de navegación deberían considerar esta condición cuando se presenta cotidianamente a la misma hora y en el mismo lugar. Aquí

es donde entra el uso potencial de la inteligencia artificial como apoyo para el diseño de rutas vehiculares. Sabemos que hoy en día existen muchas aplicaciones modernas que “aprenden automáticamente” de circunstancias pasadas para apoyarnos en la toma de decisiones. Bueno, para el diseño de rutas no es diferente.

Por ejemplo, sabemos que en las zonas escolares se intensifica el tráfico entre la 1:00 y las 3:00 de la tarde, invariablemente. Entonces, si una aplicación de este tipo diseña una ruta que atraviesa o incluso se acerca a una zona escolar, debería “predecir” el tiempo adicional que tomará circular por estas zonas y así dar un tiempo estimado más cercano a la realidad, para no llevarnos la sorpresa de que el tiempo de tránsito se agudiza.

De esta forma, si el módulo de inteligencia artificial de la aplicación de navegación tiene acceso a datos históricos de tráfico y aprende de éstos, podría sugerir mejores rutas de acuerdo con la hora del día y las zonas que son consideradas por las diferentes alternativas.

En el Cuerpo Académico “Inteligencia Computacional” de la UAM Cuajimalpa, trabajamos en el análisis de este tipo de problemas, para proponer y evaluar algoritmos de optimización apoyados con métodos de aprendizaje automático. Además, en el proyecto de investigación “Inteligencia computacional aplicada al análisis y resolución de problemas en redes”, se estudian problemas de optimización en redes, entre los cuales las redes vehiculares son un caso particular.

■ **Diálogo entre la IA y el arte: ■ ¿imitación o imaginación?**

■ Una de las áreas de investigación dentro del Departamento de Artes y Humanidades de la UAM Lerma es el empleo de tecnologías digitales en los procesos creativos. Por tal motivo, es natural que en el equipo se realice investigación en el campo de la inteligencia artificial aplicada desde diferentes perspectivas a distintos procesos artísticos que pueden ir desde la automatización de tareas simples y repetitivas, hasta modelar, en teoría, diferentes

propuestas de generación automática sin intervención humana.

A través de la Convocatoria de “Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera. Modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022” del antes Conahcyt, llevamos a cabo un proyecto denominado: “La imaginación artística como paradigma de investigación científica; datos urbanos para la generación de conocimiento, a través del uso de inteligencia artificial”. En este proyecto utilizamos un pequeño clúster de seis unidades de procesamiento gráfico (GPU) de gran tamaño para entrenar Redes Generativas Adversativas (GAN, por sus siglas en inglés). Las GAN son un proceso computacional que posibilita la creación de nuevos materiales con propiedades similares a las del material de entrada. En otras palabras, se trata de una red capaz de generar nuevos materiales a partir de una base preexistente. En el contexto del proyecto, el objetivo es aprovechar las GAN para generar audio, imagen y video derivado de registros audiovisuales de la Ciudad de México, así como revisar los alcances estéticos de estas tecnologías y observar cómo estos materiales dialogan con los procesos creativos de los artistas involucrados en el proyecto.

Es importante destacar que la mirada con la que se aborda el proceso tecnológico pone en el centro de la investigación la capacidad actualmente irremplazable de la imaginación humana. Si bien es cierto que las evidencias en el desarrollo científico, particularmente en el campo de las neurociencias computacionales, permiten imaginar que en un futuro se puedan modelar máquinas con imaginación y habilidades equivalentes a las del cerebro humano, los logros del campo de la inteligencia artificial general (IAG) nos indica que aún faltan muchas piezas del rompecabezas para emular lo que conocemos como imaginación humana. La IAG es la IA que, en términos coloquiales, alcanza el libre albedrío, en contraposición con la IA que resuelve problemas acotados.

Ante esta realidad es que nos preguntamos, más allá de la moda, más allá del efecto mediático que tienen las grandes empresas al insertar el concepto de inteligencia artificial en el discurso social a manera de “grial salvador” y, sobre todo, más allá de



Figura 4. La inteligencia artificial podría completar piezas inconclusas compuestas por grandes personas compositoras.

los innegables alcances que se tienen en este momento y que son visibles al utilizar plataformas como ChatGPT, DeepSeek, Dall-E, entre otras: ¿cuál es el verdadero alcance creativo de la IA en el terreno del arte? ¿Que reemplaza, que imita y, sobre todo, qué propone la IA en el terreno del arte? ¿Cómo influyen las bases de datos con las que se entrenan los grandes modelos de IA comercial en la generación de los resultados? ¿En qué momento podemos marcar la transición de la imitación, la variación y la recombinación a la originalidad?

En el terreno de lo humano, una discusión formal acerca de conceptos como la imaginación, el talento y la creatividad deberá contemplar también el proceso de aprendizaje –formal o informal–, la repetición, la atención y por ende la enseñanza. ¿De qué manera aprendieron los “grandes genios” a realizar su trabajo? El estudio en la historia del arte nos permite observar cómo las ideas artísticas evolucionan y de qué manera una propuesta particular deriva de una recombinación de ideas anteriores, sin descartar, obviamente, la aportación puntual de individuos particulares que tuvieron la inteligencia de hacer transformaciones más allá de lo establecido en un momento y contexto determinado. Hasta cierto umbral todos los humanos estamos posibilitados de imaginar ideas originales y desarrollar las técnicas necesarias para materializar propuestas artísticas, a

través de la práctica y el estudio de materiales equivalentes. En otras palabras, la imaginación humana es un proceso de aprendizaje, exploración, entrenamiento y estudio de ejemplos. ¿Son estos procesos transferibles a los entornos digitales?

Dicho lo anterior, existe la dificultad de plantear la posibilidad de que mecanismos computacionales puedan proponer materiales originales. Tal vez, de manera totalmente especulativa, la respuesta radica en conceptos como “autoconciencia”, “expresividad” y “sentimentalidad”. Los mecanismos computacionales sin autoconciencia podrán tal vez aprender, repetir e, incluso, plantear materialidades nunca antes vistas; sin embargo, por el momento, los creadores más talentosos estarán un paso más adelante, marcando la pauta de lo que es posible y no posible.

A manera de analogía, es probable que en la creación artística suceda lo que aconteció con el ajedrez en los años noventa. En algún momento los procedimientos computacionales creados por humanos generaron algoritmos que en la actualidad le ganan a cualquier humano, incluso a los mejores del mundo; sin embargo, el juego del ajedrez continúa y se beneficia de la existencia de dichos algoritmos. En el arte puede ser que suceda lo mismo: las máquinas producirán poesía, novelas, películas y música, y a final de cuentas, serán un elemento más en el curso del arte.

El empleo de los procedimientos que, en su conjunto, definen el campo de la inteligencia artificial en el campo de las artes, la música y el análisis de sonido tiene aplicaciones atractivas e interesantes de valor social, industrial y cultural. Sin lugar a dudas, la IA agilizará procesos, democratizará procedimientos y pondrá en manos de muchas personas posibilidades creativas básicas complejas hasta el momento. En el terreno de la investigación, ayudará a entender mecanismos y procesos creativos, funcionando a manera de microscopio, apoyando procesos de inferencia, deducción y abstracción de conceptos.

Como creador, los algoritmos de generación de materiales de manera mecánica serán un recurso más dentro de la paleta de posibilidades que simplificará parte de mis procesos y me permitirá generar metáforas

y recursos creativos. Sin embargo, por el momento no hay evidencias cercanas de poder crear una inteligencia artificial general con autoconciencia expresiva que logre simple y llanamente “imaginar”, sino que hemos estado utilizando el término para recursos regenerativos.

Es conocida la historia del llamado Turco mecánico, ese dispositivo de mediados del siglo XVIII que simulaba ser un autómatas que jugaba al ajedrez, pero que en realidad escondía en su interior a un maestro humano experto en el juego. Como creador involucrado con la relación entre el arte, la tecnología y el desarrollo computacional, en este particular momento de la evolución sociotecnológica, me intrigan más los humanos jugadores de ajedrez escondidos bajo las mesas que los turcos mecánicos simulados. Estos humanos con sus habilidades para integrar imaginación y cómputo son, en mi opinión, los verdaderos artistas contemporáneos, y ahí radica la importancia de estudiar y entender los procedimientos computacionales que están detrás de estos modelos generativos. Resulta importante incluir la reflexión dentro de los espacios universitarios.

■ Herramientas para el diseño

■ La IA está revolucionando la producción gráfica en el diseño de productos, al ofrecer beneficios como la automatización de procesos, la exploración de nuevas ideas, la optimización de recursos, la personalización, mejoras en la calidad e integración de impresión y fabricación digital.

Como parte del desarrollo de la tesis doctoral titulada *Modelo de proceso para identificación visual a partir de íconos*, realizada en la UAM Azcapotzalco, se aplicaron procesos computacionales que brindaron la posibilidad de trabajar con un banco de datos de más de mil imágenes de iconografía proveniente de la indumentaria indígena de Chiapas, México, de forma eficiente. La meta del proyecto fue crear, a partir de la iconografía, un lenguaje visual digital nuevo con la posibilidad de usarse en múltiples productos de diseño (estampados, impresiones, entre otros) evitando así la apropiación cultural. Esto es gracias a que las propuestas del lenguaje visual digital

son producto de un análisis en el que se fragmenta la iconografía manteniendo sólo sus cualidades formales para obtener a partir de ellas una expresión visual propia.

Este trabajo se desarrolló en tres etapas: investigación de campo, análisis y generación de propuestas de diseño con procesos computacionales; en este texto, sólo se presenta la parte del análisis visual y se describe la forma de operar computacionalmente los desarrollos gráficos.

El análisis visual se hizo con base en un proceso de identificación visual de íconos de las muestras recopiladas; se trabajó con siete comunidades del estado de Chiapas, de los grupos lingüísticos tzotzil y tzeltal por ser grupos representativos en la producción de textiles e indumentaria indígena de México, que incluye diversos motivos susceptibles de trasladarse a lenguaje visual digital, a modo de preservación y difusión de la cultura prehispánica mexicana. Cada ícono está compuesto de elementos geométricos más elementales que llamamos abstracciones visuales. Cada abstracción visual se identifica con una letra para ir formando un “alfabeto” de los elementos geométricos que componen una única prenda.

Las muestras recopiladas fueron 255 prendas de indumentaria y se identificaron un total de 1 275 íconos. El análisis visual implica identificar íconos manualmente y son de dos tipos: simétricos y asimétricos. Los íconos que son simétricos, al manipularse, deben mantenerse como agrupaciones de formas simples para preservar su “identidad visual” o cualidades estéticas que permiten reconocerlos. Por otro lado, con base en las entrevistas realizadas con expertos, se optó por trabajar el análisis de los íconos geométricos solamente, debido a que la mayoría de los grupos trabajan formas de este tipo, aunque cabe mencionar que existen excepciones. El análisis visual de íconos tiene cuatro pasos, para dar lugar al quinto (véase la **Figura 5**):

1. Identificación de iconografía en indumentaria indígena.
2. Digitalización de los íconos identificados.
3. Análisis geométrico visual a partir de isometrías (simetría, asimetría).

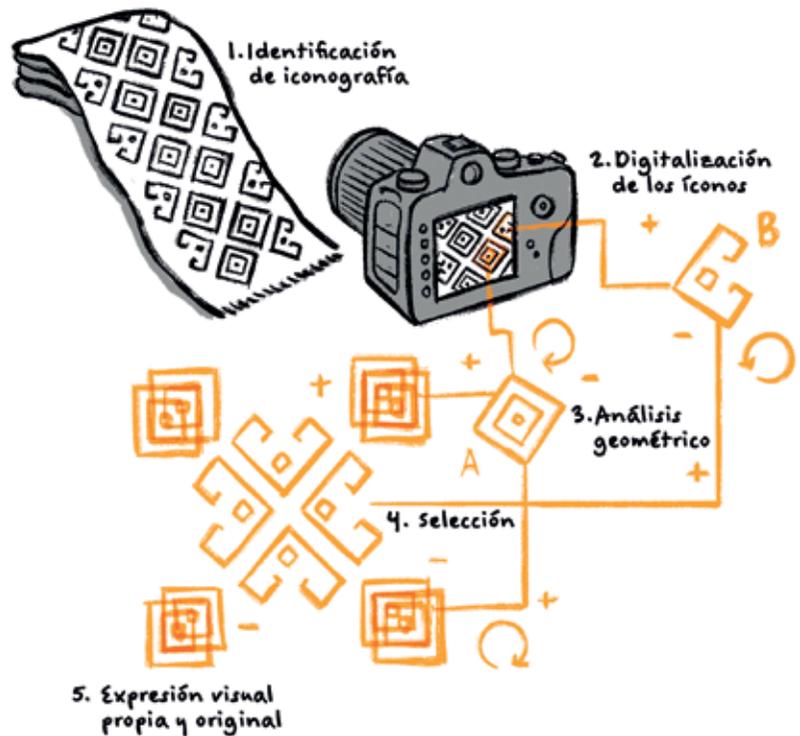


Figura 5. El análisis visual de íconos tiene cuatro pasos, para dar lugar al quinto: 1) identificación de iconografía en indumentaria indígena, 2) digitalización de los íconos identificados, 3) análisis geométrico visual a partir de isometrías (simetría, asimetría), 4) selección de abstracciones visuales (éstas alimentan a la herramienta computacional); finalmente, 5) se produce una expresión visual propia y original.

4. Selección de abstracciones visuales (éstas alimentan a la herramienta computacional).
5. Finalmente, se produce una expresión visual propia y original.

Para el análisis, se trabajó por medio de operadores o controladores tales como: reflexión horizontal y vertical (imagen espejo), traslación horizontal y vertical (estiramiento), rotación, yuxtaposición horizontal y vertical (empalme), y escalamiento (agrandamiento o encogimiento). Con estos ocho operadores se pueden realizar combinaciones que, con el uso de un solo ícono, permiten generar una infinidad de nuevos patrones variables.

El uso de los procesos computacionales potenció la capacidad de desarrollo de propuestas visuales y facilitó el análisis de datos; sin embargo, el análisis visual se realizó manualmente (por medio de la vista), lo que valida el hecho de que el diseñador es quien identifica y selecciona la muestra de datos que

alimenta al programa de generación de propuestas visuales. Así, es indispensable que el especialista, en este caso la persona diseñadora, sea quien realice el desarrollo del alfabeto gráfico.

A modo de conclusión:

- El proyecto puede beneficiarse enormemente de la inteligencia artificial, pues ésta puede desarrollar por sí misma íconos y abstracciones visuales, así como la generación automatizada del alfabeto que a su vez alimenta la generación de las propuestas gráficas. Para ello se requiere de un banco de datos mayor que permita a la IA reconocer o identificar patrones de comportamiento en la iconografía.
- Hay que aclarar que en esta investigación nos apoyamos en bibliografía y fuentes de origen etnográfico, que define la iconografía de cada grupo lingüístico.
- La herramienta computacional diseñada para este proyecto, llamada Iconos Frame, nos dio el apoyo para la generación de propuestas gráficas y se logró trabajar con la mayor parte de la información recopilada, lo que manualmente habría llevado mucho más tiempo.
- El *modelo de proceso* desarrollado y puesto en práctica en la investigación es aplicable a otros bancos iconográficos provenientes de indumentaria o textiles de las diversas regiones de México y el mundo, pero también se puede usar con iconografía proveniente de objetos cerámicos, joyería, pintura, escultura y edificaciones, entre otros.

La sección “*Deepfakes* y clonación de voz” fue escrita por el doctor Eric Alfredo Rincón García; el apartado “Laboratorio de Inteligencia Artificial, UAM Azcapotzalco: reflexión, investigación e intervención en IA” es una aportación del doctor Óscar Lozano Carrillo; “La IA como apoyo para el diseño adecuado de rutas vehiculares” es un texto del doctor Abel García Nájera; “Diálogo entre la IA y el arte: ¿imitación o imaginación?” contó con la redacción del doctor Hugo Solís García, y “Herramientas para el diseño” fue escrito por la doctora Sandra Rodríguez Mondragón, ellas y ellos adscritos a la Universidad Autónoma Metropolitana.

Eric Alfredo Rincón García

UAM Iztapalapa
rincon@xanum.uam.mx

Óscar Lozano Carrillo

UAM Azcapotzalco
exato@azc.uam.mx

Abel García Nájera

UAM Cuajimalpa
agarcian@cua.uam.mx

Hugo Solís García

UAM Lerma
h.solis@correo.ler.uam.mx

Sandra Rodríguez Mondragón

UAM Azcapotzalco
srm@azc.uam.mx

Lecturas sugeridas

Revista IA UAM-A, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Disponible en: <Inteligencia Artificial UAMA – Explorando la IA para un uso social | Inteligencia Artificial UAMA>, consultado el 4 de marzo de 2025.

Pajuelo Morán, J. C. y C. Álvarez García (1999), “¿Inteligencia Artificial? ¿Contra quién?”, *Puertas a la Lectura*, 6-7:61-68. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1075316>, consultado el 4 de marzo de 2025.

Reyes-García, C. A., E. F. Morales Manzanares, H. J. Escalante Balderas y A. A. Torres-García (eds.) (2019), *Aprendizaje e inteligencia computacional*, México, Academia Mexicana de Computación. Disponible en: <https://www.amexcomp.mx/media/publicaciones/aprendizaje-e-inteligencia-computacional-2019.pdf>, consultado el 4 de marzo de 2025.

La Universidad Autónoma Metropolitana ofrece diferentes licenciaturas y posgrados relativos a cómputo e inteligencia artificial:

Azcapotzalco

- Licenciatura
 - Licenciatura en Ingeniería en Computación
- Posgrado
 - Maestría en Ciencias de la Computación
 - Maestría y doctorado en Ingeniería de Procesos
 - Maestría y doctorado en Optimización
 - Maestría y doctorado en Diseño y Visualización de la Información

Cuajimalpa

- Licenciatura
 - Licenciatura en Ingeniería en Computación
 - Licenciatura en Tecnologías y Sistemas de Información
- Posgrado
 - Maestría y doctorado en Ciencias Naturales e Ingeniería

Iztapalapa

- Licenciatura
 - Licenciatura en Computación
 - Licenciatura en Ingeniería Electrónica
- Posgrado
 - Maestría y doctorado en Ciencias y Tecnologías de la Información

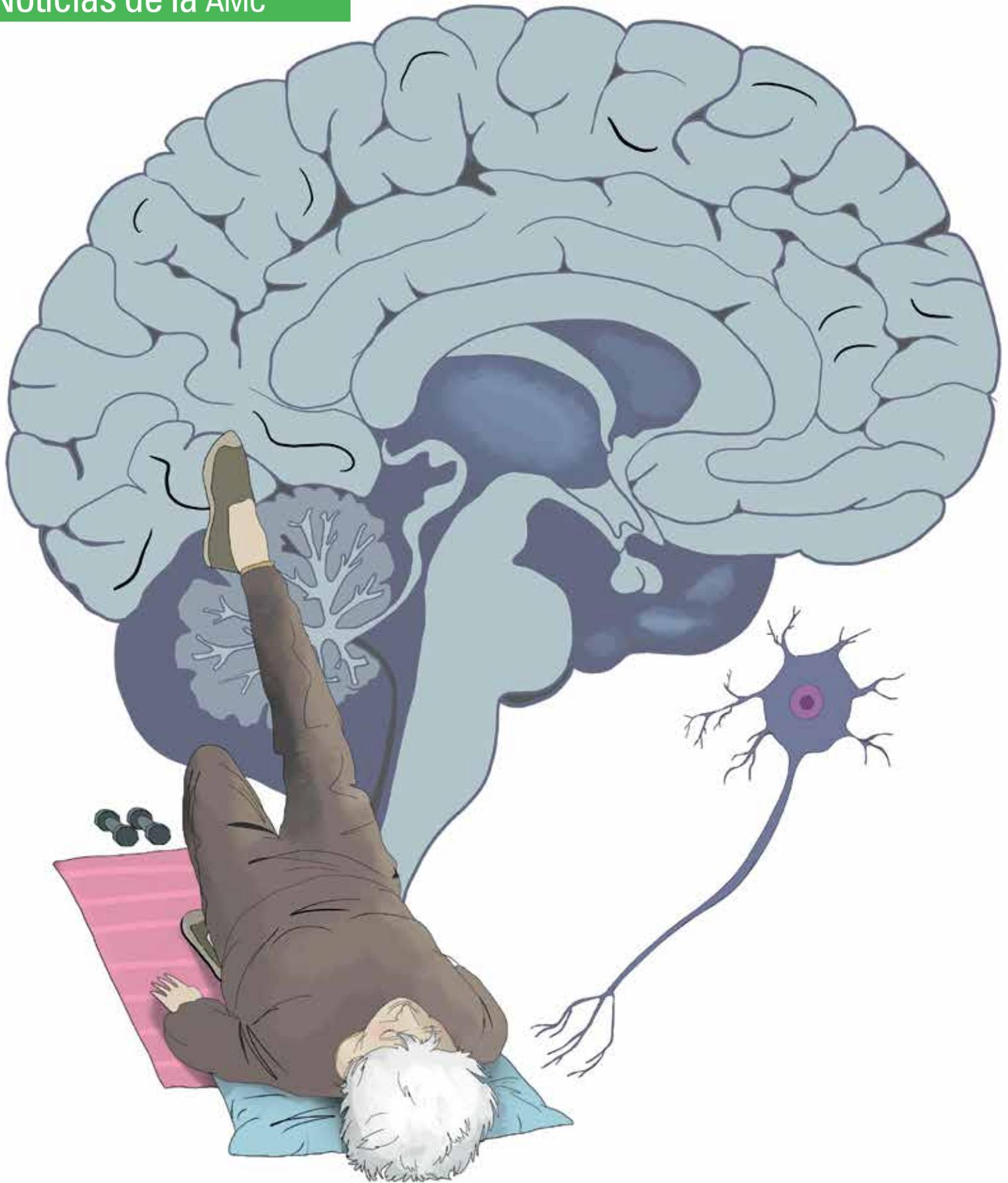
Lerma

- Licenciatura
 - Licenciatura en Ingeniería en Computación y Telecomunicaciones
 - Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Mecatrónicos Industriales
 - Licenciatura en Educación y Tecnologías Digitales

Novedades científicas

Desde las redes

Noticias de la AMC



Julio César Domínguez Méndez y Nancy Patricia Gómez Crisóstomo

Colesterol en el cerebro: ¿bueno o malo?

En el proceso metabólico del colesterol cerebral intervienen muchas moléculas, pero la más significativa es el CY46A1, que se encarga de eliminar hasta el 75% de todo el colesterol cerebral. Cuando no existe un adecuado metabolismo del colesterol, puede promoverse el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer, Parkinson y Huntington, entre otras.

Introducción

El cerebro contiene alrededor del 23 % del colesterol del cuerpo. Este colesterol es fundamental para la estructura y el funcionamiento de las membranas celulares que forman las neuronas. Fuera del sistema nervioso central (SNC) los requerimientos de colesterol se obtienen a través del consumo de alimentos o por la producción de este lípido en el hígado.

En el cerebro, la cantidad de colesterol no depende del nivel presente en la sangre. Esto se debe a la función de la barrera hematoencefálica (BHE), la cual evita el ingreso de este lípido desde la periferia hacia el SNC. Por esta razón, las células neuronales deben producir su propio colesterol dentro del cerebro.

Función del colesterol en el cerebro

La distribución del colesterol en el SNC está dividida en un 70 % como constituyente de las **vainas de mielina**. Estas últimas sirven de aislante eléctrico a los axones para que el impulso eléctrico viaje más rápido. El 30 % restante se encuentra en las neuronas y células de la glía, donde mejora la organización y fluidez de las membranas sinápticas, al facilitarse la formación de vesículas transportadoras de neurotransmisores, lo que aumenta la eficiencia de la transmisión sináptica y es clave para procesos como la memoria y el aprendizaje.

Vainas de mielina

Capas de grasa que cubren las fibras nerviosas y aceleran la transmisión de señales eléctricas en el sistema nervioso.

Síntesis de colesterol en el cerebro

La producción de colesterol en el cerebro es un proceso complejo que ocurre dentro de las células, específicamente en una estructura llamada retículo endoplásmi-

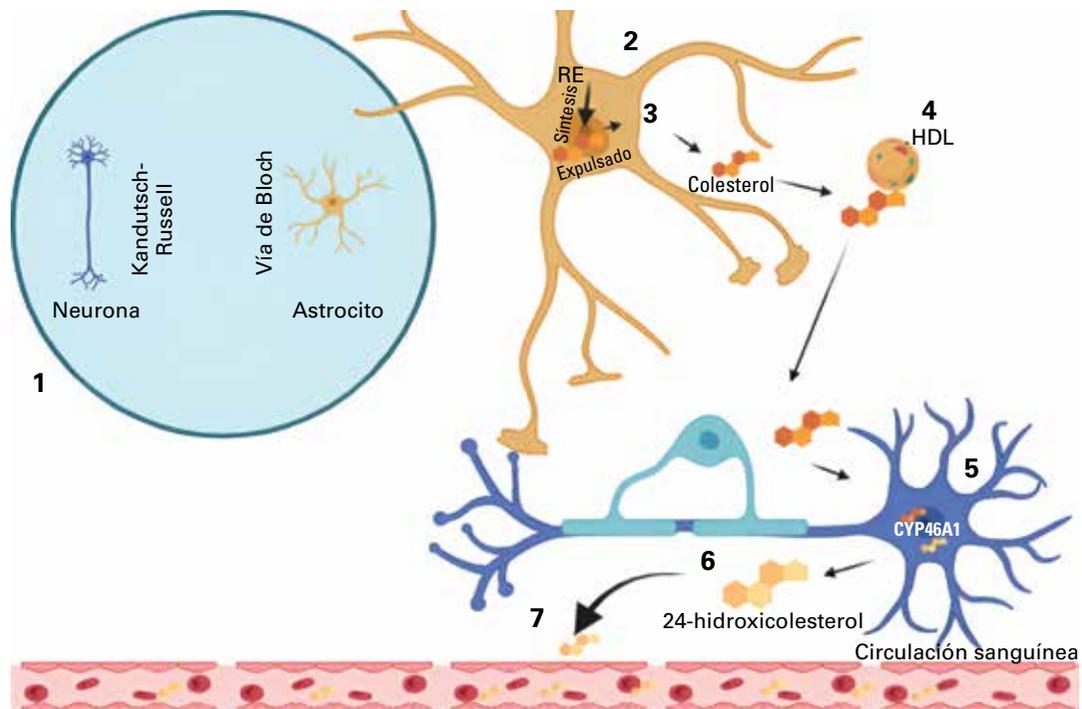


Figura 1. Síntesis y metabolismo del colesterol cerebral. 1) Representación esquemática de las vías de síntesis del colesterol. 2) La síntesis se lleva a cabo en el RE, de donde es transferido a la membrana plasmática. 3) El colesterol astrocítico es expulsado luego de su síntesis. 4) El colesterol sintetizado es transportado en lipoproteínas de alta densidad (HDL). 5) Una vez en las neuronas, las enzimas CYP46A1 pueden convertir el colesterol en 24-hidroxicolesterol (24-OHC). 6) El 24-OHC es expulsado de las neuronas. 7) Finalmente, puede difundirse a la circulación sanguínea para ser metabolizado por el hígado.

Astroцитos
Células del cerebro y la médula espinal que forman parte del sistema nervioso; su función es brindar soporte a las neuronas, regular el flujo sanguíneo cerebral y participar en la protección del cerebro.

Oligodendrocitos
Células del sistema nervioso central que se encargan de producir la mielina, la sustancia que recubre y aísla las fibras nerviosas para que las señales eléctricas viajen más rápido.

co (RE). Este proceso se lleva a cabo principalmente en dos tipos de células: los **astroцитos** y las neuronas, a través de dos rutas metabólicas conocidas como las vías de Bloch y Kandutsch-Russell (**Figura 1**).

Un estudio reciente demostró que los astroцитos son capaces de producir dos a tres veces más colesterol que las neuronas y los fibroblastos. Al mismo tiempo, se descubrió que los **oligodendrocitos** producen incluso mayor cantidad que los propios astroцитos.

Papel de la barrera hematoencefálica en el metabolismo del colesterol cerebral

La BHE es una estructura compuesta por diferentes células (endoteliales, pericitos y astroцитos) que forman una barrera física y metabólica entre el SNC y la periferia. Cuando el colesterol producido en las neuronas y los astroцитos excede el nivel normal, se activa un mecanismo que aumenta su eliminación. Este proceso es regulado por la enzima CYP46A1, miembro de la familia del citocromo P450, específica del SNC.

La enzima CYP46A1 se aloja principalmente en el retículo endoplásmico de las neuronas y se encarga de eliminar el 75-85 % del colesterol en el cerebro humano. Su función principal es convertir el colesterol en 24-hidroxicolesterol (24-OHC), un metabolito oxidado del colesterol que, al atravesar la BHE, ingresa a la circulación periférica para ser finalmente eliminado por el hígado.

Curiosamente, la enzima CYP46A1 también regula la respuesta inmune y tiene un papel importante en la correcta función de la memoria y la cognición, por lo que se ha asociado al desarrollo de enfermedades neurodegenerativas, específicamente a la enfermedad de Alzheimer (**Figura 2**).

El colesterol en las enfermedades neurodegenerativas

Se ha observado que las alteraciones en el metabolismo del colesterol cerebral, como su acumulación o falta de eliminación adecuada, están asociadas

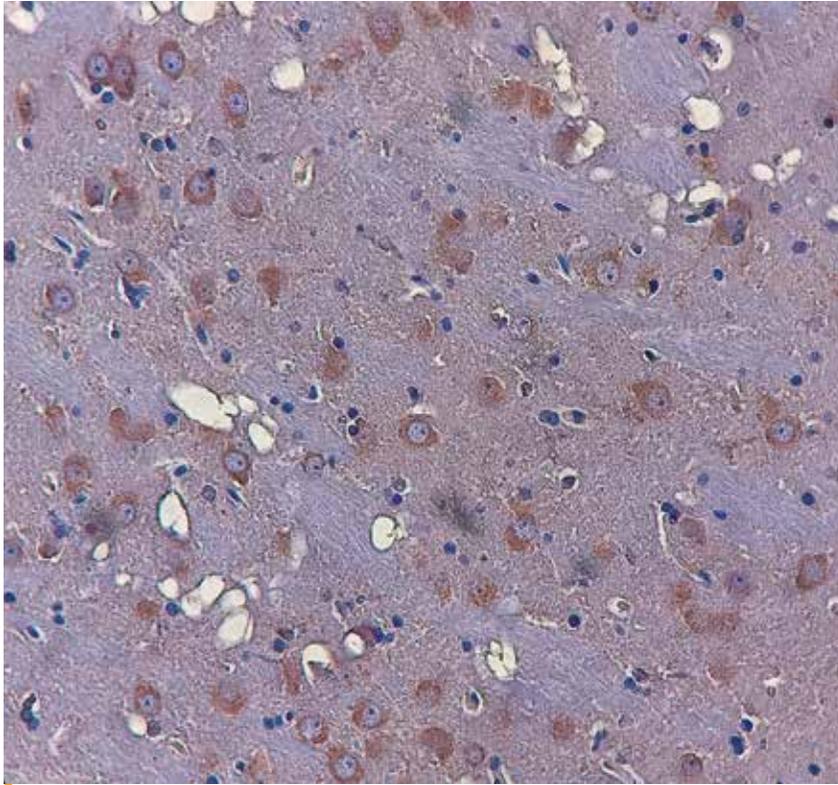


Figura 2. Detección de la enzima CYP46A1 en el tálamo de cerebros de ratas mediante inmunohistoquímica, una técnica que usa anticuerpos y colorantes para visualizar proteínas en tejidos.

con el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Alzheimer, la enfermedad de Huntington, la enfermedad de Parkinson, así como depresión, esclerosis lateral amiotrófica, accidente cerebrovascular y envejecimiento. Sin embargo, aún no está claro si estos cambios son la causa primaria de estas enfermedades o si son consecuencias del daño neuronal que ocurre en etapas avanzadas.

■ El papel de la enzima CYP46A1

■ La enzima CYP46A1 regula la tasa de eliminación de colesterol, su tasa de producción y también participa en su recambio por medio del 24-OHC. En tal sentido, la enzima CYP46A1 se relacionó con las enfermedades neurodegenerativas, ya que los niveles de 24-OHC aumentaron en plasma en pacientes con enfermedad de Alzheimer en etapas tempranas y en pacientes con demencia.

Por el contrario, los pacientes con enfermedad de Alzheimer avanzada habían disminuido los nive-

les de 24-OHC en plasma, lo que probablemente refleja la marcada destrucción del SNC y, por lo tanto, una reducción en los niveles de la enzima CYP46A1 y el flujo de 24-OHC desde el cerebro a la circulación periférica.

Se ha demostrado que en la enfermedad de Huntington existe una disminución del nivel de 24-OHC; dicho nivel se ha relacionado de la misma manera con la gravedad de la enfermedad. Esta reducción tiene fuertes relaciones con la disminución de los niveles de la enzima CYP46A1 en diferentes zonas del cerebro en pacientes que sufren la enfermedad.

■ Conclusión

■ En conclusión, el colesterol en el cerebro no es ni intrínsecamente bueno ni malo; su función depende de un equilibrio. Como se ha explicado a lo largo del artículo, es crucial para el funcionamiento adecuado del sistema nervioso central, pues participa en la formación de membranas y la comunicación neuronal.



Sin embargo, un desajuste en su metabolismo, ya sea por exceso o deficiencia, puede llevar a alteraciones que favorecen el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Alzheimer, Parkinson y Huntington.

La investigación actual ha avanzado en la comprensión de los mecanismos que regulan el colesterol en el cerebro, pero aún queda mucho por descubrir

sobre cómo estos procesos se alteran en diversas enfermedades. Un área clave de estudio es el papel de la enzima CYP46A1 en la eliminación del colesterol y cómo su disfunción podría estar relacionada con el daño neuronal. Por lo tanto, la modulación del metabolismo del colesterol cerebral representa una posible vía para el desarrollo de nuevas terapias en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas. Este conocimiento podría abrir nuevas oportunidades terapéuticas para prevenir o tratar estas condiciones, lo que es un desafío crucial para la ciencia médica en los próximos años.

Julio César Domínguez Méndez

Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán.
dominguezmendezjc@gmail.com

Nancy Patricia Gómez Crisóstomo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica Multidisciplinaria de Comalcalco.
nancy.gomez@ujat.mx

Lecturas recomendadas

- Fernández-Rua, J. M. (2020), "Mapa del colesterol cerebral y enfermedades neurodegenerativas", *Biotech Magazine and News* [en línea]. Disponible en: <https://biotechmagazineandnews.com/mapa-del-colesterol-cerebral-y-enfermedades-neurodegenerativas/>, consultado el 3 de febrero de 2025.
- Gich, J., M. Quintana y D. Zambón (2004), "¿Existe relación entre el colesterol y el deterioro cognitivo?", *Clínica e Investigación en Arteriosclerosis*, 17(1):48-53.
- Navarro Meza, M. y J. L. Orozco (coords.) (2020), *Cuidado y alimentación en la neurodegeneración, Alzheimer y Parkinson. Información básica*, México, Editorial Universidad de Guadalajara.

Afectaciones en el embarazo por el estrés durante la pandemia del covid-19

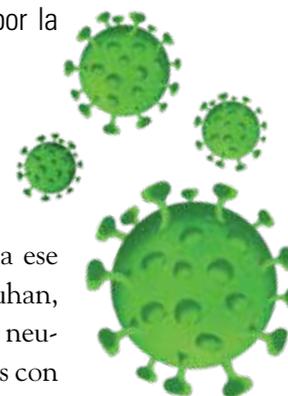
A finales de diciembre de 2019 se reportó una serie de casos de neumonía atípica, en ese momento de origen desconocido, en Wuhan, China. Días más tarde se identificó al agente etiológico como un nuevo coronavirus. A este nuevo coronavirus se le llamó SARS-CoV-2, y a la enfermedad que produjo se le denominó covid-19.

La pandemia por covid-19 presentó ciertas características que pudieron incrementar los niveles de reacción al estrés tanto en la población general como en las mujeres embarazadas. Las personas que se encontraban en cuarentena fueron particularmente vulnerables a complicaciones neuropsiquiátricas debido al distanciamiento gradual, lo que provocó la aparición de trastornos como la depresión y la ansiedad. Diferentes investigaciones mostraron resultados que relacionaron el estrés causado por la pandemia en mujeres embarazadas con un mayor riesgo de cesárea, bajo peso al nacer y parto prematuro, en comparación con aquellas que no presentaron estrés por la enfermedad.

Introducción

A finales de diciembre de 2019 una serie de casos de neumonía, hasta ese momento de origen desconocido, fue identificada en la ciudad de Wuhan, China. La presentación clínica de estos casos era parecida a la de una neumonía de tipo viral, con fiebre, tos seca e imágenes radiológicas incompatibles con las de una neumonía causada por las bacterias y los virus más comunes.

A poco más de un mes del inicio del brote, la Organización Mundial de la Salud (OMS) anunció que la enfermedad causada por el nuevo coronavirus, aislado en Wuhan, China, sería llamada covid-19, que respondía a la forma corta del nombre “coronavirus disease 2019”, mientras que el agente causal fue denominado SARS-CoV-2 por el Comité Internacional de Taxonomía de Virus. A partir de este



punto, la línea cronológica de eventos, así como el aumento de infectados, se tornó muy precipitada. Conforme pasaron los días, el SARS-CoV-2 se propagó en todas las regiones del mundo y progresivamente el número de infectados y decesos se aceleró bruscamente en los meses subsiguientes, hasta el punto en que el 11 de marzo de 2020 la OMS caracterizó esta enfermedad como pandemia.

Según la experiencia de epidemias y pandemias pasadas, surgieron serias preocupaciones, como el miedo a la muerte, sentimientos de soledad e irritabilidad, entre otras complicaciones mentales.

El método crucial para romper la cadena de contagio fue el distanciamiento social; es decir, la separación efectiva de las personas infectadas y de aquellos con sospecha de infección. Este proceso de separación se tuvo que realizar de diferentes maneras. Mientras que el aislamiento no fue absoluto, se implementaron medidas que limitaron el contacto y la exposición. El distanciamiento social también se refirió a todas las medidas que buscaban reducir el contacto, como el aislamiento y la cuarentena.

Las personas que se encontraban en cuarentena fueron particularmente vulnerables a complicaciones neuropsiquiátricas, debido al distanciamiento gradual entre sí. En ausencia de comunicación interpersonal, fue más probable que la depresión, el estrés y la ansiedad ocurrieran y empeoraran. Además, la cuarentena redujo la disponibilidad de una intervención psicosocial oportuna. Toda la familia de desórdenes relacionados con el estrés debió ser de especial consideración: desde el trastorno por estrés agudo hasta el trastorno por estrés posttraumático (TEPT), que pudo presentarse hasta en el 30-40% de las personas afectadas, como ocurre en el contexto de otros desastres.

La evidencia también indicó que las mujeres tuvieron más probabilidades de experimentar síntomas de TEPT. Un grupo particularmente vulnerable durante el brote viral fueron las mujeres embarazadas. Los trastornos de salud mental fueron una causa común de morbilidad durante el embarazo, con aproximadamente 12% de mujeres que experimentaron depresión y hasta 22% que experimentaron altos niveles de ansiedad al final del embarazo. Las

mujeres embarazadas fueron más vulnerables a las infecciones debido a su sistema inmunológico deprimido y, en general, se consideraron en mayor riesgo de complicaciones graves.

El estrés y la ansiedad materna prenatal, ya sea en desastres o no, suelen ser factores de riesgo bien establecidos, relacionados con partos prematuros, bajo peso al nacer y problemas de salud infantil, y pueden tener efectos duraderos en la descendencia.

■ **Estrés en el embarazo: riesgos para el recién nacido**

■ El estrés puede ser entendido como un estado fisiológico de respuesta a un estado adverso, expresado con tensión física y mental, que genera una alteración en la homeostasis existente de la persona, a partir de un desequilibrio entre las demandas externas y los recursos personales, o en su defecto y en gran medida, como resultado de la percepción que se tiene de éstos.

Durante la pandemia, el estrés se percibió como un problema de salud mental, especialmente en etapas susceptibles, como el embarazo, donde cobró mayor relevancia al considerar que la gestación es un periodo crítico para la madre, debido a los diversos cambios físicos y también psicológicos que implican una reestructuración mental para el desarrollo de la identidad materna, pues atraviesa cambios morfológicos y funcionales como consecuencia de la interacción entre el genoma fetal y el ambiente externo.

El estrés en la madre presentó una influencia sobre el peso del feto, especialmente en el segundo trimestre. Al respecto, existieron vías fisiopatológicas propuestas para explicar este fenómeno. La primera postuló que el incremento de las concentraciones de cortisol en la gestante permitió el paso de esta hormona a través de la placenta, lo que generó una alteración en el sistema neuroendocrino fetal e inhibió su crecimiento. La segunda consideró que la liberación de catecolaminas en situaciones de estrés en el embarazo repercutió en la perfusión uterina, y como consecuencia hubo una disminución y limitación sustancial de los aportes nutrimentales al feto.

Diferentes investigaciones mostraron resultados donde el estrés causado por la pandemia en mujeres



embarazadas se relacionó con un mayor riesgo de cesárea, bajo peso al nacer y parto prematuro, en comparación con aquellas gestaciones que se desarrollaron sin la enfermedad.

Investigaciones como la de Medina-Jiménez y cols. (2020) encontraron una correlación positiva entre el estrés y la edad gestacional. Asimismo, Wu y cols. (2020) indicaron un aumento clínicamente significativo de la prevalencia de síntomas de estrés, depresión y ansiedad después de la declaración de transmisión de persona a persona del covid-19.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, también hubo estudios donde diferentes autores encontraron un aumento en nacimientos de bajo peso. Por ejemplo, Kirchengast y Hartmann (2021) mencionaron que la prevalencia del peso al nacer entre los nacimientos de Austria osciló entre el 4.7 y el 5.2 % entre 2005 y 2019, mientras que la prevalencia de bajo peso al nacer fue del 7.9 % en enero/febrero de 2020. Otros estudios relacionaron la pandemia con los nacimientos prematuros, como el de Hedermann y cols. (2021), quienes observaron un incremento con una prevalencia del 5.2 % de nacimientos prematuros en comparación con años anteriores.

Existen diferentes artículos que revelaron que la gravedad de la infección por covid-19 en mujeres embarazadas tuvo una influencia sustancial sobre los resultados neonatales adversos, como trabajo de parto prematuro, bajo peso al nacer, infección neonatal e ingreso a cuidados intensivos.

En conclusión, la pandemia por covid-19 tuvo diferentes efectos en los niveles de estrés en mujeres embarazadas, y este estrés provocado por la pandemia condujo a problemas de salud tanto mentales como gestacionales, como los nacimientos prematuros y de bajo peso. Por ello, investigar estrategias para reducir los resultados neonatales adversos en mujeres embarazadas infectadas con SARS-CoV-2 es una necesidad.

Luis Hector Osorio Mercado

Universidad Autónoma del Estado de México.
luis.lhom@gmail.com

Referencias específicas

- Hedermann, G., P. L. Hedley, M. Bækvad-Hansen, H. Hjalgrim, K. Rostgaard *et al.* (2021), "Danish premature birth rates during the covid-19 lockdown", *Archives of Disease in Childhood-Fetal and Neonatal*, 106(1):93-95.
- Kirchengast, S. y B. Hartmann (2021), "Pregnancy Outcome during the First covid-19 Lockdown in Vienna, Austria", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7):3782. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/ijerph18073782>>, consultado el 5 de febrero de 2025.
- Lebel, C., A. MacKinnon, M. Bagshawe, L. Tomfohr-Madsen y G. Giesbrecht (2020), "Elevated depression and anxiety symptoms among pregnant individuals during the covid-19 pandemic", *Journal of Affective Disorders*, 277:5-13.
- Medina-Jiménez, V., M. de la L. Bermúdez-Rojas, H. Murillo-Bargas, A. C. Rivera-Camarillo, J. Muñoz-Acosta *et al.* (2020), "The impact of the covid-19 pandemic on depression and stress levels in pregnant women: a national survey during the covid-19 pandemic in Mexico", *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, 1-3.
- World Health Organization (2019), "Rolling updates on coronavirus disease (covid-19)", *Coronavirus Disease (covid-19): events as they happen*. Disponible en: <<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/events-as-they-happen>>, consultado el 5 de febrero de 2025.
- Wu, Y., C. Zhang, H. Liu, C. Duan, C. Li *et al.* (2020), "Perinatal depressive and anxiety symptoms of pregnant women during the coronavirus disease 2019 outbreak in China", *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 223(2):240.e1-240.e9.

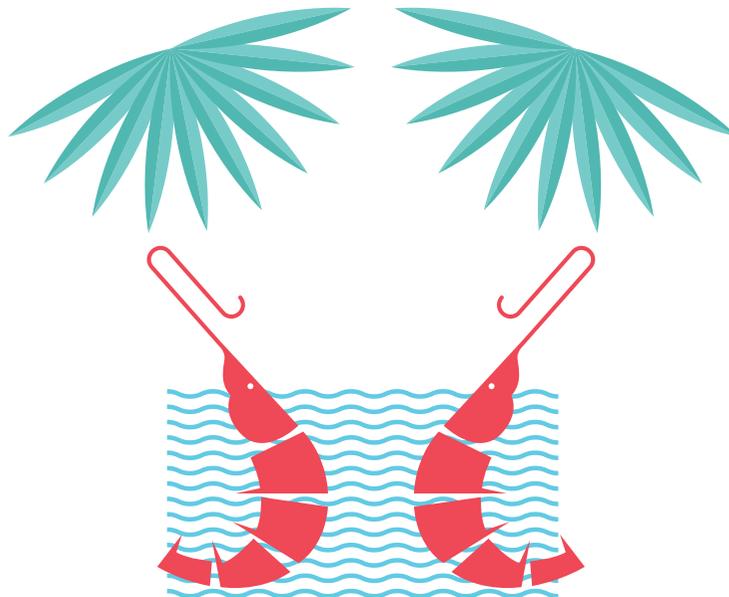
Édgar J. López-Naranjo, César A. Dueñas-Bolaños y José Navarro-Partida

Camarón y agave, un coctel de salud a la vista

Después de su aplicación, el porcentaje de un fármaco que permanece en el ojo es menor que el 5%; esto provoca que los tratamientos médicos sean más costosos, largos y molestos para el paciente. El empleo de nuevos materiales que incrementen el tiempo de residencia de los fármacos es de vital importancia. La solución puede estar a simple vista en residuos como los desechos del camarón y el agave.

El ojo humano

El ojo es uno de los órganos más sofisticados e importantes del cuerpo humano. Tratar las enfermedades que lo afectan puede ser una tarea muy difícil, debido a que su estructura y fisiología son muy complejas. Este órgano posee distintas barreras químicas y físicas que actúan como mecanismos de defensa para evitar el ingreso de objetos extraños que puedan dañarlo. Sin embargo, estas mismas barreras dificultan el transporte de fármacos a las diferentes zonas que lo



constituyen, y afectan directamente el tratamiento de distintos padecimientos, debido a que el porcentaje del fármaco que permanece en el ojo después de su aplicación es realmente bajo (< 5%). Como consecuencia, la frecuencia en la administración de los medicamentos se incrementa en gran medida, así como todos los efectos negativos que esto conlleva; por ejemplo, los gastos del tratamiento, las molestias ocasionadas al paciente y el número de visitas al médico para dar seguimiento a la evolución del padecimiento (Dubashynskaya y cols., 2020; Hasan y cols., 2020).

Así pues, la búsqueda de materiales que permitan mejorar el transporte de fármacos en el ojo es uno de los principales objetivos de la medicina en la actualidad. Materiales como el quitosano y los nanocristales de celulosa, los cuales pueden ser obtenidos a partir de residuos industriales, específicamente de la industria de los crustáceos y del tequila, respectivamente, son firmes candidatos para lograr este objetivo (Cabanillas Bojórquez y cols., 2020; Espino y cols., 2014).

Desacetilación
Reacción mediante la cual se elimina un grupo acetilo de una molécula.

El camarón

De acuerdo con Cabanillas Bojórquez y cols. (2020), el 9.8% de la producción de alimentos marinos corresponde a los crustáceos, y el camarón es el más importante. La producción anual de camarón en México se estima en cientos de miles de toneladas,

lo que implica que de igual forma se generan miles de toneladas de desechos sólidos al año. Específicamente, en el año 2017, en México se produjeron 227 000 toneladas de camarón, las cuales generaron más de 100 000 toneladas de desechos compuestos por el exoesqueleto, la cabeza y la cola, los cuales constituyen la fracción no comestible. Estos desechos son ricos en proteínas, lípidos, quitina y carotenoides, los cuales poseen aplicaciones relevantes en la industria, lo que los convierte en una fuente de alto valor agregado que puede y debe ser explotada.

Quitosano

El quitosano (véase la Figura 1) es un biopolímero que se obtiene a partir de la **desacetilación** parcial, preferentemente bajo condiciones alcalinas, de la quitina presente en los exoesqueletos y paredes celulares de diversos organismos, entre los cuales el camarón es una de las principales fuentes comerciales para su extracción. Este material presenta propiedades fundamentales para el transporte de fármacos dentro del ojo, como son la biocompatibilidad, biodegradabilidad, nula toxicidad y distintos tipos de actividad biológica. *Biocompatibilidad* quiere decir que interactúa de forma positiva con el entorno biológico en el que es empleado, provocando una respuesta clínica óptima sin generar efectos adversos en el organismo receptor. Su *biodegradabilidad* le permite descomponerse químicamente gracias a la acción de distintos agentes biológicos y condiciones ambientales. Su *nula toxicidad* lo hace seguro para el organismo, de modo que no generará reacciones adversas. En cuanto a los distintos tipos de *actividad biológica*, puede decirse que es capaz de inhibir el crecimiento de diferentes tipos de bacterias (antimicrobiano), hongos (antifúngico), células tumorales (antitumoral), además de presentar *actividad antioxidante*, ya que protege al organismo del daño causado por especies reactivas del oxígeno. También es *mucoadhesivo* gracias a la atracción entre su superficie cargada positivamente y la superficie con carga negativa de las mucosas, lo cual incrementará el tiempo de contacto del fármaco aplicado con la superficie ocular para aumentar su biodisponibilidad.

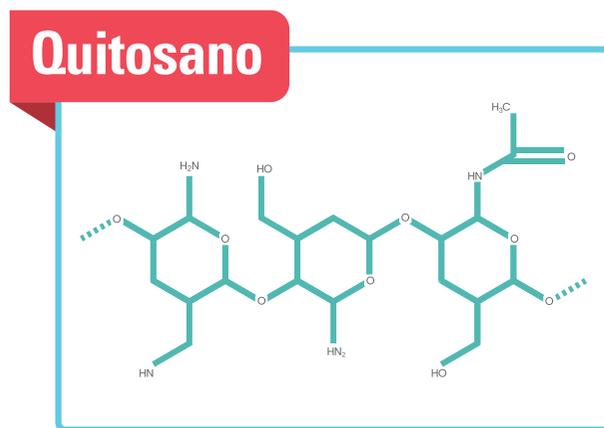


Figura 1. Estructura química del quitosano. Fuente: Cabanillas Bojórquez y cols., 2020.

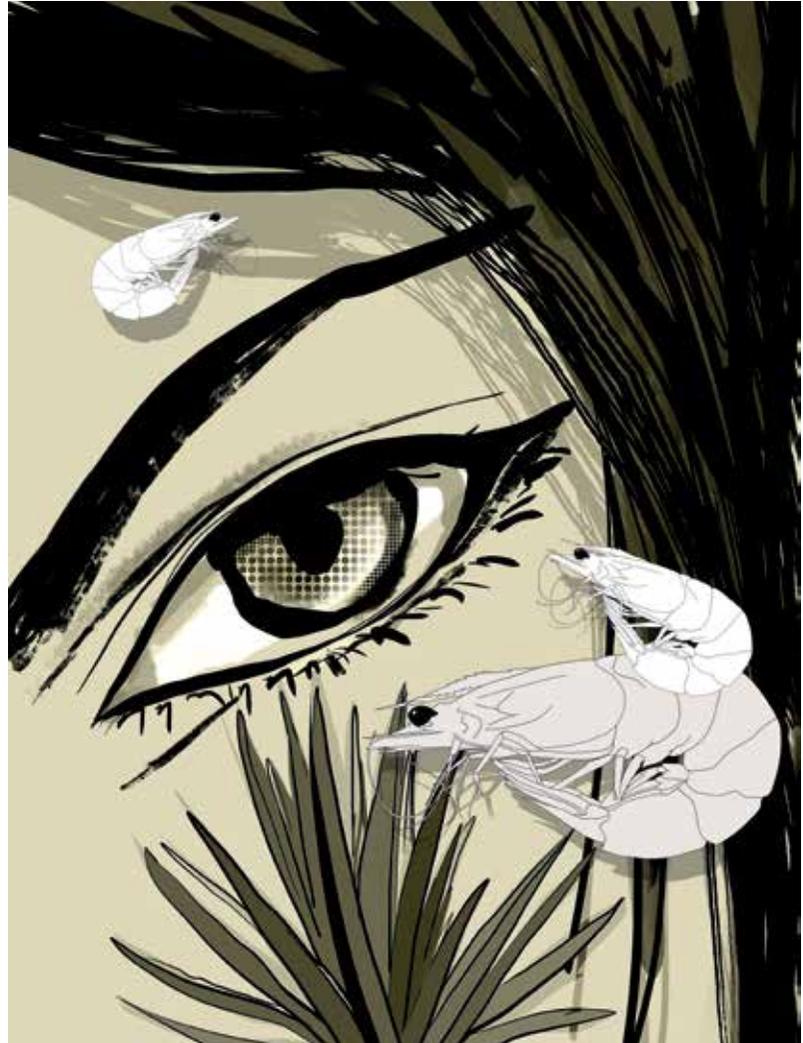
Todo esto hace del quitosano un material prometededor para el transporte de fármacos en el ojo humano, que permite aumentar el tiempo de retención del fármaco para que actúe de forma más eficiente en las superficies donde se encuentre adherido, o que penetre al interior del globo ocular. Sin embargo, a pesar de todas sus ventajas, el quitosano presenta de igual forma algunas limitaciones. Una de las más importantes es su baja solubilidad en medios neutros y alcalinos. Para superar esta limitación, este material tiene que ser modificado químicamente, lo cual puede llegar a tener un efecto negativo en algunas de las excelentes propiedades descritas anteriormente (Younes y Rinaudo, 2015; Kumar y cols., 2016; Zamboulis y cols., 2020).

Aplicaciones actuales del quitosano

Debido a las propiedades previamente mencionadas, el quitosano se ha empleado tanto de manera independiente como mezclado con otros polímeros en el desarrollo de distintas formulaciones en forma de nanopartículas, hidrogeles, cápsulas, microesferas, etc., para liberar diversos medicamentos. En los trabajos realizados a la fecha, se han observado altos porcentajes de encapsulamiento en los modelos estudiados. Por ejemplo, de 85 % en el caso de estudios que usaron curcumina y de 90 % en estudios que emplean diclofenaco, los cuales han sido además exitosos al mantener la integridad estructural de los fármacos encapsulados (Kumar y cols., 2016).

El agave

El *Agave tequilana* Weber var. azul es la especie de agave más cultivada en México debido a su importancia dentro de la industria de las bebidas; sus plantaciones abarcan miles de hectáreas a lo largo de cinco estados de nuestro país. La piña de esta especie de agave constituye la materia prima más importante para la producción del tequila. Lamentablemente, este proceso genera miles de toneladas de residuos agroindustriales constituidos principalmente por el bagazo residual y las hojas del agave, los cuales son desechados directamente en los campos de cultivo.



El aprovechamiento de esta biomasa residual ofrece la oportunidad de reducir la huella ambiental y la generación de gases de efecto invernadero, con lo cual se contribuiría al desarrollo de la bioeconomía.

Aunque la composición química de este tipo de residuos varía en función de su origen biológico y edad, en todos los casos su principal componente es la celulosa, la cual presenta excelentes propiedades biológicas, químicas y mecánicas que la hacen atractiva para un sinnúmero de aplicaciones en la industria farmacéutica, textil, de alimentos y de biomateriales (Espino y cols., 2014).

Nanocristales de celulosa

Los nanocristales de celulosa (véase la [Figura 2](#)) se obtienen a partir de la celulosa, la cual es el biopo-

Nanocrisales de celulosa

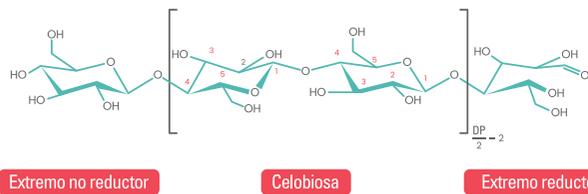
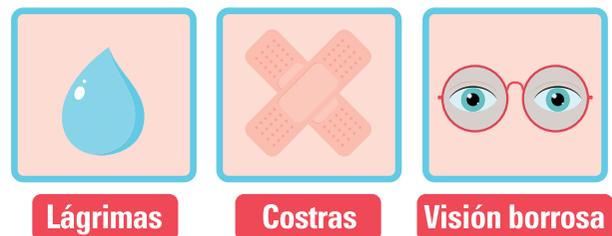
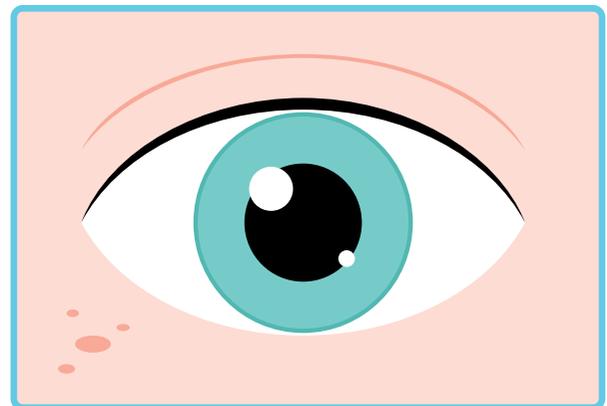


Figura 2. Estructura química de nanocrisales de celulosa. Fuente: Hasan y cols., 2020.

límero más abundante en el mundo. El diámetro de los cristales varía entre 5-50 nanómetros y su longitud, entre 100-500 nanómetros, dependiendo del material vegetal seleccionado como fuente de celulosa (por ejemplo, madera, henequén, algodón, agave, arroz, algas, cáscaras de plátano, entre otros) y de las características específicas de los múltiples procesos empleados para su obtención. Los nanocrisales además de ser biodegradables, biocompatibles y mucoadhesivos, como el quitosano, presentan una alta resistencia mecánica, lo que permite que soporten cargas elevadas, así como **hidrofilicidad**, lo que los hace un material muy afín al agua y con una elevada área superficial relativa, ya que se trata de un nanomaterial. Este tipo de materiales, cuyo tamaño se aproxima al de una milésima parte del ancho de un grano de arena, presentan propiedades muy diferentes a las de los materiales de uso común. Por ejemplo, en el caso de un material con forma de esfera, de diámetro (d), la relación área superficial/volumen es igual a $6/d$; conforme el diámetro de la esfera disminuye, su área superficial relativa aumentará, incluso en varios cientos de veces para esferas con diámetros menores que 100 nanómetros. Esto permite para los nanomateriales una mayor interacción con otros materiales empleados en el transporte de fármacos en el globo ocular. Por otra parte, a pesar de sus ventajas, se ha observado que los nanocrisales de celulosa presentan un grado de toxicidad considerable que puede llegar a afectar al ser humano, por lo cual es indispensable incluir evaluaciones sobre la toxicidad de estos materiales en futuros es-

Hidrofilicidad

Capacidad de un material para atraer y retener moléculas de agua.



Lágrimas

Costras

Visión borrosa

Figura 3. Problemas causados por dosis no adecuadas. Fuente: Hasan y cols., 2020.

tudios en los que se evalúe su desempeño en la liberación de medicamentos oftálmicos. Además, usados en dosis no adecuadas pueden ocasionar problemas como lágrimas, costras y visión borrosa (Cabanillas Bojórquez y cols., 2020; Hasan y cols., 2020).

■ Aplicaciones actuales de nanocrisales de celulosa

■ Actualmente, estos materiales se emplean en una amplia variedad de sistemas de liberación de medicamentos, en los cuales se utilizan como estabilizadores, emulsificantes, surfactantes, agentes formadores de películas y lubricantes. Los productos actuales basados en el empleo de nanocrisales de celulosa han demostrado una excelente viscosidad, lo que les ha permitido incrementar el tiempo de residencia de los medicamentos aplicados en el globo ocular (Hasan y cols., 2020).

■ Empleo de desechos del camarón y del agave para el desarrollo de nuevos materiales

■ Sin lugar a dudas, tanto el quitosano como los nanocrisales de celulosa poseen un conjunto de

propiedades que los convierte en candidatos ideales para desarrollar nuevos materiales que ayuden a resolver los problemas actuales relacionados con la administración de medicamentos en el ojo humano. Sin embargo, falta saber mucho sobre la toxicidad de estos materiales y sus efectos en el ser humano, efectos derivados de su propia naturaleza o de las modificaciones químicas a las que son sometidos para mejorar su función. Mejorar las formulaciones existentes con el fin de resolver los problemas presentes en la actualidad es el siguiente reto. La clave para hacerlo puede estar en el empleo de aditivos, el pretratamiento de los materiales, la reformulación de las mezclas actuales y la mejora de los métodos de producción.

Los autores agradecen a Ricardo Martínez Magallanes @atoleMagallanes por el diseño de las imágenes que ilustran este trabajo.

Édgar J. López-Naranjo

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías-Universidad de Guadalajara.

edgar.lopezn@academicos.udg.mx

César A. Dueñas-Bolaños

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías-Universidad de Guadalajara.

cesar.duenas7449@alumnos.udg.mx

José Navarro-Partida

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Medicina y Ciencias de la Salud.

josenavarro@itesm.mx

Referencias específicas

- Cabanillas Bojórquez, L. A., E. P. Gutiérrez-Grijalva y J. B. Heredia (2020), "Desechos de camarón: un coctel de oportunidades para la industria", *Ciencia*, 71(4):i1-i4.
- Dubashynskaya, N., D. Poshina, S. Raik, A. Urtti y Y. A. Skorik (2020), "Polysaccharides in Ocular Drug Delivery", *Pharmaceutics*, 12(1):22.
- Espino, E., M. Cakir, S. Domenek, A. D. Román-Gutiérrez, N. Belgacem y J. Bras (2014), "Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from industrial by-products of Agave tequilana and barley", *Industrial Crops and Products*, 62:552-559.
- Hasan, N., L. Rahman, S. H. Kim, J. Cao, A. Arjuna, S. Lallo, B. H. Jhun y J. W. Yoo (2020), "Recent advances of nanocellulose in drug delivery systems", *Journal of Pharmaceutical Investigation*, 50(6):553-572.
- Kumar, A., A. Vimal y A. Kumar (2016), "Why Chitosan? From properties to perspective of mucosal drug delivery", *International Journal of Biological Macromolecules*, 91:615-622.
- Younes, I. y M. Rinaudo (2015), "Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications", *Marine Drugs*, 13(3):1133-1174.
- Zamboulis, A., S. Nanaki, G. Michailidou, I. Koumentakou, M. Lazaridou, N. M. Ainali, E. Xanthopoulou y D. Bikiaris (2020), "Chitosan and its derivatives for ocular delivery formulations: Recent advances and developments", *Polymers (Basel)*, 12(7):1-67.



Rosalba Salgado-Morales, Luis Enrique Rojas-Espinoza y Édgar Dantán-González

Síntesis de péptidos a través de maquinarias no convencionales

Las péptido sintetetas no ribosomales (NRPS) son enzimas especializadas que sintetizan péptidos de una manera muy diferente a como convencionalmente se fabrican la mayoría de las proteínas en los seres vivos, a través del ribosoma y con un ARNm. Las NRPS contienen múltiples módulos que se encargan de seleccionar y modificar a los aminoácidos, uniéndolos en una secuencia precisa y creando moléculas únicas con propiedades especiales.

Introducción

El escritor uruguayo Eduardo Galeano solía decir: “Libres son quienes crean, no copian, y libres son quienes piensan, no obedecen; educar es enseñar a dudar”, y en esencia de esto trata la ciencia, de poner en duda lo aprendido, de ahí que tenemos nuevos descubrimientos que parecerían contradecir o sepultar los conceptos y dogmas anteriores.

En el campo de la biología, uno de los pilares más importantes es el dogma central de la biología molecular en el que tradicionalmente se representa un flujo de información que va desde un gen, pasando por el ARNm, para llegar a la síntesis de una proteína. Sin embargo, con el avance de la tecnología y las nuevas áreas del conocimiento, se han descubierto flujos emergentes en todas direcciones. Uno de los procesos clave en la biosíntesis de péptidos involucra la acción de las enzimas conocidas como péptido sintetetas no ribosomales (NRPS, por sus siglas en inglés). Estas enzimas destacan por su capacidad para generar proteínas sin depender de las instrucciones genéticas almacenadas en el ADN ni de la maquinaria ribosomal, encargada convencionalmente de este proceso. Las NRPS pueden considerarse “máquinas moleculares” altamente especializadas, responsables de la síntesis de metabolitos secundarios denominados péptidos no ribosomales. Estos metabolitos secundarios son compuestos que los organismos producen en respuesta a diversos factores, como mecanismos de defensa, competencia ecológica e interacciones con otras especies. A diferencia de la síntesis ribosomal tradicional,

ARNm

Molécula de ARN de cadena sencilla que sirve como plantilla para sintetizar una proteína.

Péptido

Cadena corta de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos.

Metabolito secundario

Molécula no esencial en el crecimiento, desarrollo o reproducción del organismo productor.

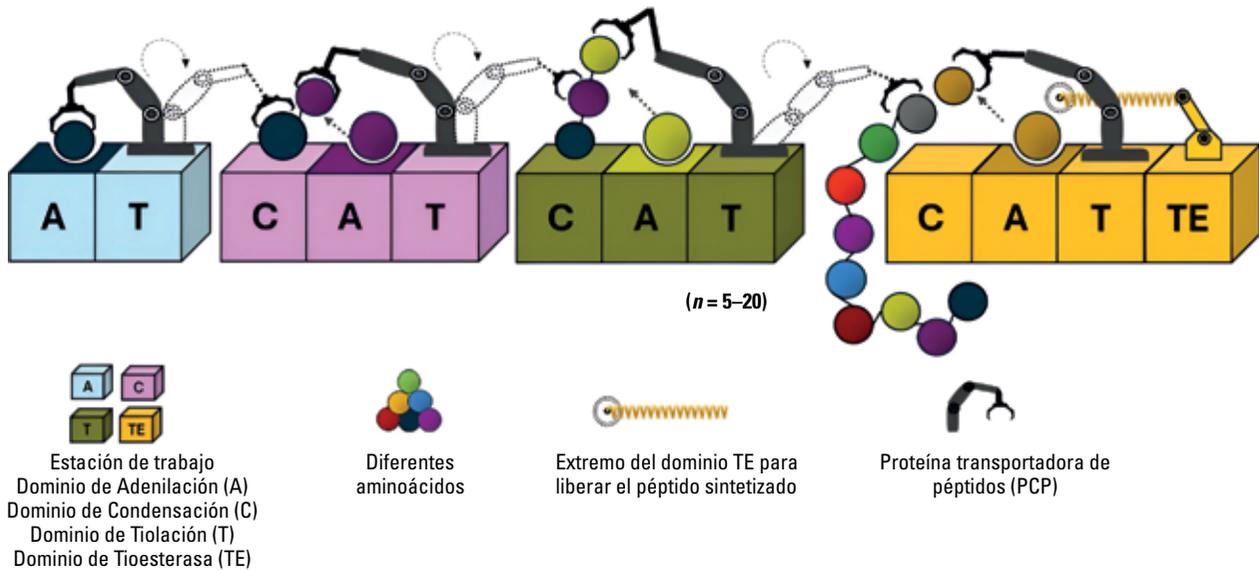


Figura 1. Línea de ensamblaje de las péptidos sintéticas no ribosomales (NRPS). Modificado a partir de Ackerley, 2016.

las NRPS no requieren las instrucciones específicas de un gen, como un ARNm, para construir estos péptidos, lo que las hace independientes de la maquinaria ribosomal clásica. Los péptidos no ribosomales poseen un enorme potencial en múltiples áreas, debido a su diversidad estructural y funcional. Sus aplicaciones abarcan desde la medicina y la veterinaria hasta la agricultura, la **biorremediación** y la industria, gracias a sus propiedades antimicrobianas, antivirales, antiparasitarias, anticancerígenas, antifúngicas, insecticidas, como biosurfactantes y pigmentos, entre otras. En este artículo exploraremos las principales características de las NRPS y sus productos, los microorganismos que los producen y las aplicaciones de estos péptidos no ribosomales en diversos campos.

■ Línea de ensamblaje molecular de las NRPS

■ En una línea de ensamblaje de manufactura, distintas piezas o componentes se combinan progresivamente para formar un producto final. De manera análoga, en las NRPS, los aminoácidos actúan como las “piezas” que alimentan la línea de ensamblaje molecular, lo que da lugar a un péptido no ribosomal. Estas “piezas” incluyen tanto aminoácidos estándar (los 20 que componen comúnmente las proteínas y están

codificados en el código genético) como aminoácidos no proteínogénicos (que no están codificados en dicho código). En una línea de producción, cada pieza pasa por estaciones de trabajo especializadas que aseguran su colocación en el orden correcto (véase la **Figura 1**).

En las NRPS, estas estaciones son los módulos, y cada módulo contiene **dominios catalíticos** que realizan tareas específicas. Por ejemplo, cada módulo incluye un dominio de adenilación (A), responsable de seleccionar un aminoácido particular y activarlo para su incorporación en la secuencia. La especificidad de esta selección depende de la estructura y la secuencia únicas de cada dominio A. Una vez activado, el aminoácido es transportado por el dominio de tiolación (T), también conocido como proteína transportadora de péptidos (PCP). Este dominio funciona como un brazo móvil que transfiere el aminoácido desde el dominio A al dominio de condensación (C) del siguiente módulo. El dominio C, por su parte, forma el enlace peptídico que une el aminoácido al péptido en crecimiento. La estructura básica de una NRPS incluye varios módulos, donde cada uno suele tener dominios C, A y T. El último módulo, además, contiene un dominio de tioesterasa (TE), que actúa como unas “tijeras” moleculares para liberar el péptido completamente ensamblado.

Biorremediación
Proceso que utiliza microorganismos para reducir las concentraciones de desechos peligrosos de un sitio contaminado.

Dominio catalítico
Región de una enzima que interactúa con el sustrato para realizar una reacción enzimática.

do. Además de estos dominios principales, las NRPS pueden incluir dominios adicionales que introducen modificaciones como glicosilaciones, acetilaciones e hidroxilaciones.

El tamaño del péptido no ribosomal está determinado por el número de módulos en la NRPS, ya que cada módulo incorpora un aminoácido específico. Por ejemplo, una NRPS con cinco módulos producirá un péptido de cinco aminoácidos. En general, las NRPS suelen tener entre cinco y 20 módulos, lo que da lugar a péptidos con secuencias y longitudes específicas. Estas características estructurales influyen directamente en la actividad biológica de los péptidos no ribosomales determinando su funcionalidad en diversos contextos biológicos y aplicaciones.

■ ■ ■ **¿Qué organismos producen péptidos no ribosomales?**

■ Las NRPS encargadas de producir péptidos no ribosomales se encuentran distribuidas en los tres dominios de la vida (*Eukarya*, *Archaea* y *Bacteria*). En eucariotas, los hongos filamentosos son los principales productores de péptidos no ribosomales, mientras que en la mayoría de los organismos superiores los péptidos no ribosomales son producidos por sus **simbiontes** microbianos. En el caso de las arqueas, las NRPS son poco frecuentes y prevalecen principalmente en las bacterias; en particular, en los filos *Proteobacteria*, *Cyanobacteria*, *Firmicutes* y *Actinobacteria* (Wang y cols., 2014). Los microorganismos del suelo como actinomicetos y *Bacilli* son de los principales productores de péptidos no ribosomales y únicamente en el género *Streptomyces* se han descrito alrededor de 10 000 péptidos no ribosomales. Por otro lado, los microorganismos de ambientes marinos son importantes productores; aproximadamente 70 % de los péptidos no ribosomales descubiertos provienen de estos organismos.

Simbionte → Organismo que establece una relación (generalmente a largo plazo) con otro organismo.

■ ■ ■ **Uso de péptidos no ribosomales**

■ Los antibióticos desempeñan un papel crucial en la lucha contra las infecciones bacterianas, ya que eliminan a las bacterias o inhiben su crecimiento y

reproducción. No obstante, el desarrollo de resistencia bacteriana a estos compuestos se ha convertido en un desafío significativo para la salud pública, con implicaciones preocupantes a nivel global.

Entre los diversos compuestos disponibles en el mercado, destacan los péptidos no ribosomales, que incluyen antibióticos con una notable diversidad de actividades biológicas. El descubrimiento de los antibióticos marcó un hito en la historia de la medicina, pues revolucionó el tratamiento de las infecciones bacterianas y redujo drásticamente las tasas de mortalidad asociadas a estas enfermedades. Algunos péptidos no ribosomales con propiedades antibióticas se utilizan ampliamente en la medicina; a continuación, algunos ejemplos. La bacitracina es una mezcla de péptidos no ribosomales producidos por *Bacillus subtilis*, y se utiliza para prevenir infecciones en lesiones leves de la piel; la vancomicina, producida por *Amycolatopsis orientalis*, es indicada en infecciones causadas por estafilococos y para tratar la endocarditis y colitis provocada por *Clostridium difficile* –también se utiliza como alternativa en pacientes alérgicos a antibióticos β-lactámicos (penicilina y meticilina), o en bacterias resistentes a la meticilina–; la daptomicina, producida por *Streptomyces roseosporus*, es un lipopéptido cíclico indicado en infecciones graves de la piel, infecciones del torrente sanguíneo o en las causadas por bacterias resistentes a la meticilina y vancomicina; la polimixina B es un antibiótico utilizado para infecciones sistémicas causadas por bacterias multirresistentes, como *Pseudomonas aeruginosa* y *Acinetobacter baumannii*, agentes importantes de enfermedades intrahospitalarias.

Otros péptidos no ribosomales son utilizados en las terapias contra el cáncer, como la bleomicina, actinomicina D y la ecteinascidina-743; inmunosupresores como la ciclosporina están indicados para evitar el rechazo en trasplantes de órganos; antihemorrágicos como la ergometrina se utilizan en la obstetricia para la prevención de hemorragias durante el parto; antihelmínticos como la emodepsida se utilizan en mascotas parasitadas con nemátodos gastrointestinales y en el tratamiento de infecciones por gusanos parásitos en humanos. Otros, como

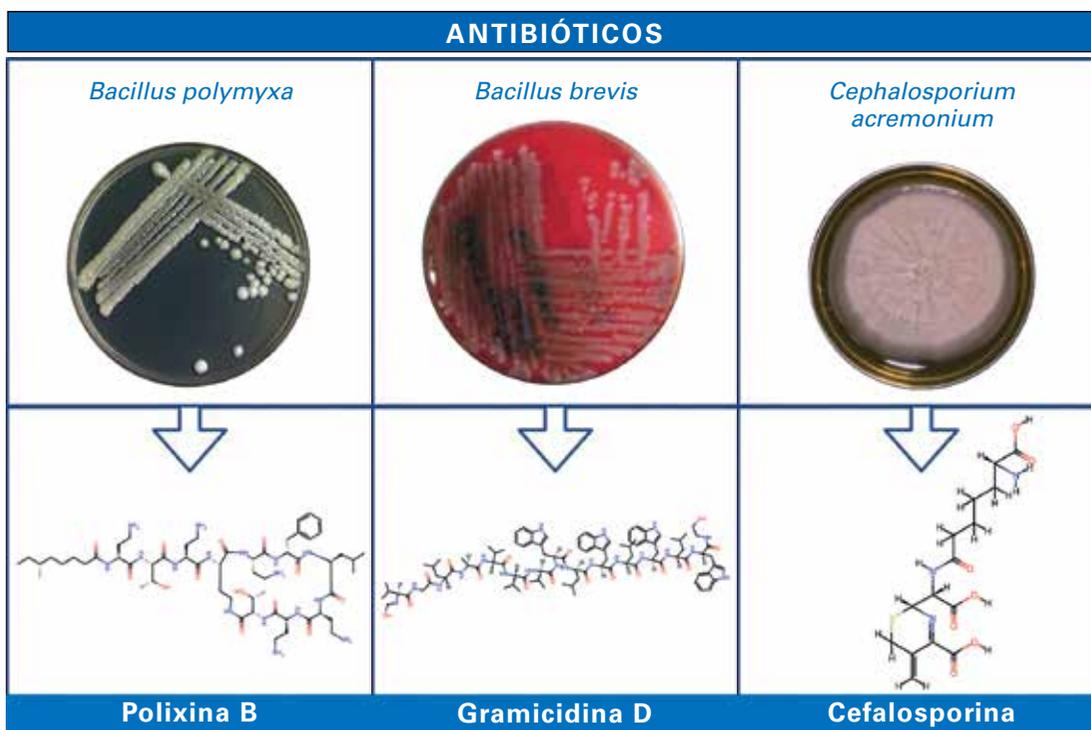
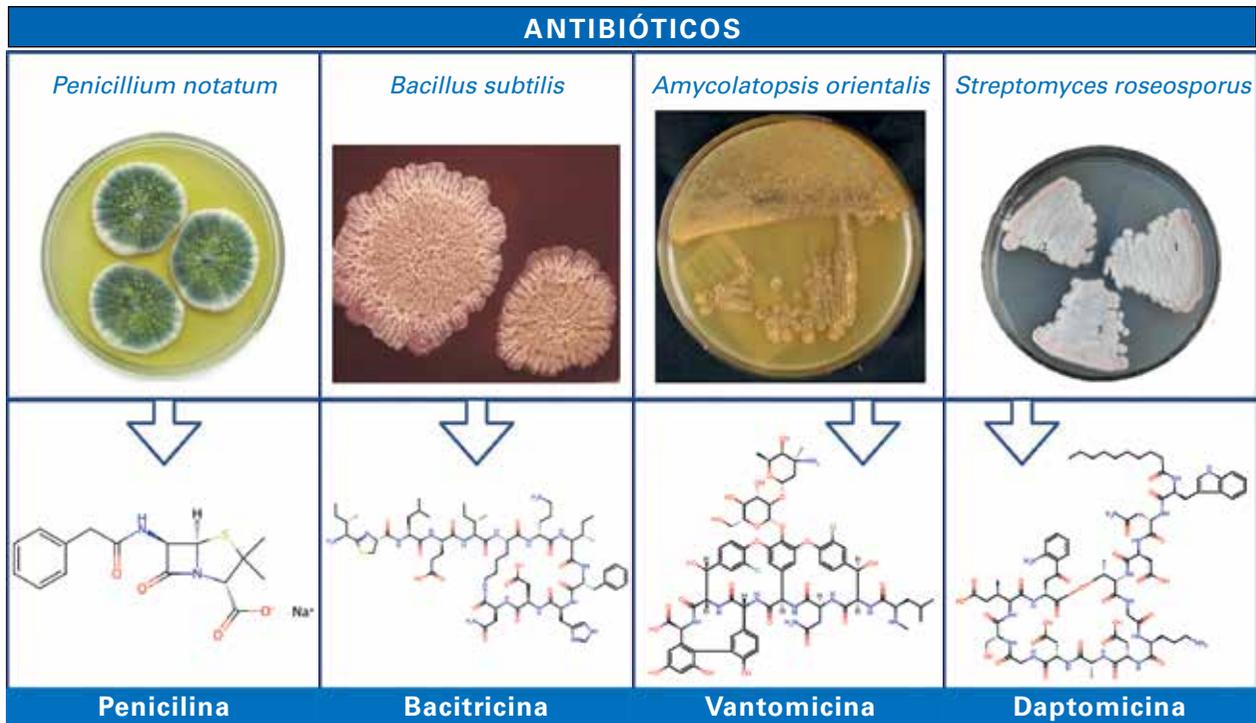


Figura 2A. Péptidos no ribosomales y sus actividades.

la nematofina, tienen potencial por su actividad antifúngica, pero aún no se encuentra disponible comercialmente (véanse las Figuras 2A y 2B). Es interesante señalar que existe una gran cantidad de

péptidos no ribosomales que se encuentran en fase de estudios clínicos y aún no están disponibles en el mercado, y hay un vasto camino por recorrer en la búsqueda de nuevos compuestos bioactivos.

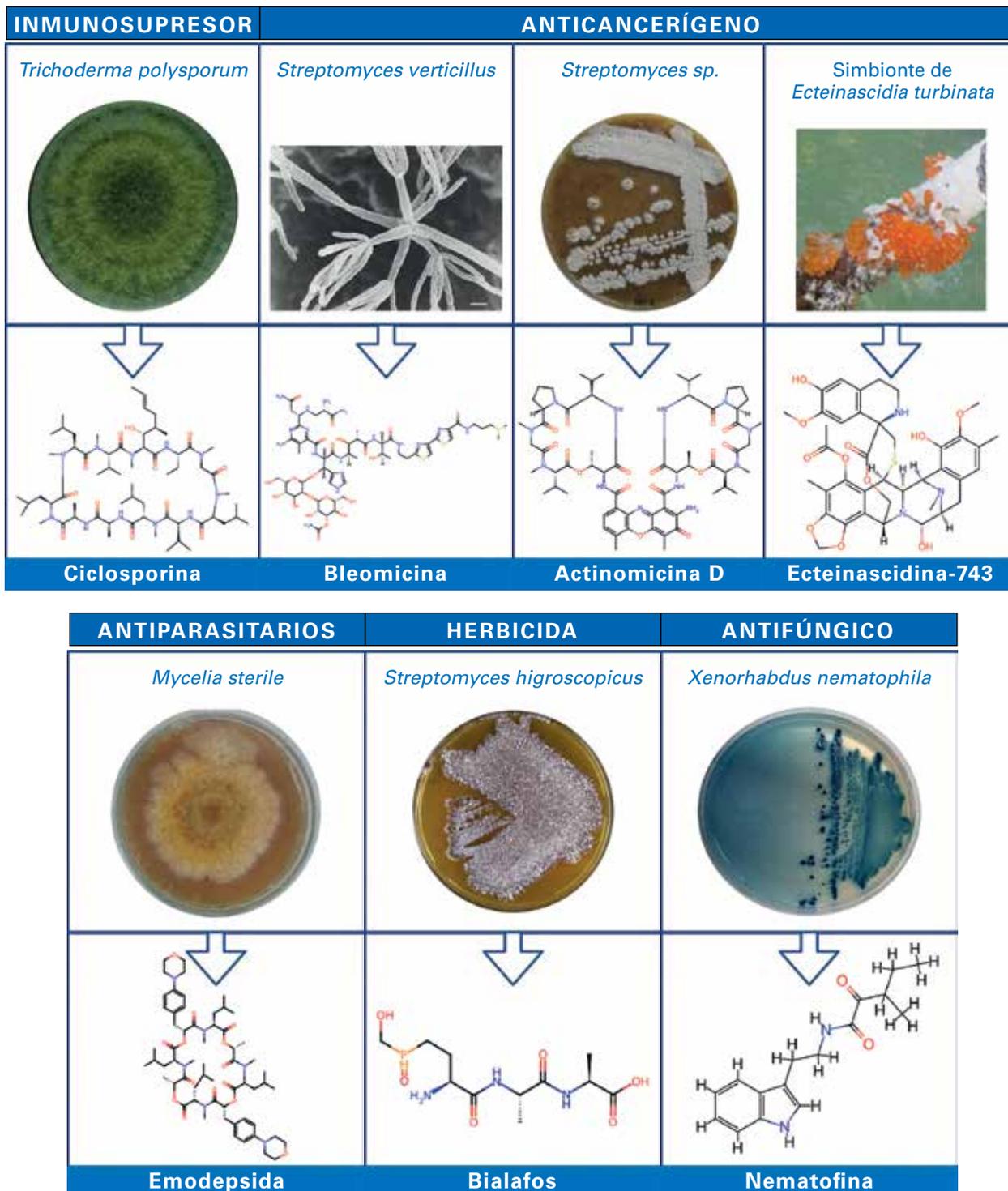


Figura 2B. Péptidos no ribosomales y sus actividades.

Minería genómica

Es el análisis de la información genómica para el descubrimiento de productos naturales.

Genoma

Es el conjunto completo de ADN de un organismo y la genómica es el estudio de los genomas.

Metagenoma

Es el genoma colectivo de microorganismos de una muestra ambiental.

■ **La minería genómica: una herramienta para la búsqueda de NRPS**
 ■ En los últimos años los avances en las tecnologías han permitido conocer los **genomas** completos, en

menor tiempo y a menor costo, con lo que se ha incrementado el número de genes, genomas y **metagenomas** disponibles en las bases de datos. Esta información es la base para analizar grandes volúme-

nes de datos con el fin de hallar patrones o elementos en el área genómica, lo que involucra, entre muchas otras posibilidades, la predicción de grupos de genes biosintéticos (BGC), incluidos aquellos que codifican para las NRPS, a partir de herramientas bioinformáticas, análisis de las secuencias de las enzimas y la identificación experimental del producto. En general, la caracterización puede ser desde un enfoque directo, siguiendo el flujo a partir de un BGC conocido, a la identificación del metabolito. Por otro lado, se puede utilizar un enfoque inverso, partiendo de un metabolito conocido hacia la búsqueda de los genes involucrados en su biosíntesis. En este sentido, la predicción de BGC se apoya en gran medida en el uso de herramientas computacionales. Una de las más utilizadas es antiSMASH, un *software* de código abierto que permite la identificación, anotación y análisis rápido de BGC de metabolitos secundarios de genomas bacterianos. Aunque antiSMASH identifica una amplia variedad de BGC, realiza análisis más profundos para la detección de NRPS y policétido sintetas (PKS) tipo I y II (Blin y cols., 2021). Además, existen otras herramientas cuyas características se describen en la [Tabla 1](#).

Nematodos entomopatógenos y sus bacterias simbiotes como fuente de péptidos no ribosomales
 En el Laboratorio de Estudios Ecogenómicos (LEE) del Centro de Investigación en Biotecnología de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, es-

tamos interesados en el estudio de las NRPS provenientes de bacterias entomopatógenas de los géneros *Photorhabdus* y *Xenorhabdus*. Estas bacterias son simbiotes de nematodos entomopatógenos y su ciclo de vida es muy interesante: las bacterias se alojan en el interior del nematodo para poder acceder al interior de un insecto hospedero, que por lo general son larvas del suelo, en donde la bacteria y el nematodo se reproducen; debido a lo anterior, los nematodos son utilizados para el control biológico contra plagas en cultivos de interés alimentario. Las bacterias son altamente letales para una gran variedad de insectos, evaden eficientemente el sistema inmune, producen toxinas insecticidas, enzimas que degradan los tejidos y demás compuestos antimicrobianos para evitar que otros microorganismos invadan el cadáver del insecto. La bacteria es esencial para la reproducción del nematodo y ésta requiere del segundo para entrar al insecto; de esta manera mantienen una simbiosis mutualista, en donde ambos se benefician. Este complejo estilo de vida y la interacción con sus hospederos (nematodo e insecto) está coordinada en gran medida por péptidos no ribosomales (Tobias y cols., 2017). En el LEE, se han aislado bacterias entomopatógenas como *Photorhabdus luminescens* HIM3 y *Xenorhabdus nematophila* SC16; se ha secuenciado su genoma y, utilizando herramientas computacionales, como antiSMASH, se buscaron genes involucrados en producir péptidos no ribosomales. Los resultados muestran que *Photorhabdus luminescens* HIM3 y *Xenorhabdus nematophila* SC16

Tabla 1. Herramientas computacionales para la detección de BGC.

Herramienta	Organismo	Predicción de BGC
antiSMASH	Bacterias, hongos y plantas	La versión bacteriana identifica 71 tipos de BGC, incluyendo NRPS y PKS tipo I
CLUSEAN	Bacterias	NRPS y PKS
ClusterFinder	Bacterias	NRPS y PKS
ClustScan	Bacterias	NRPS y PKS
NRPS-PKS/SBSPKS	Bacterias	NRPS y PKS
NPSearcher	Bacterias	NRPS y PKS tipo I e híbridos NRPS/PKS
NaPDoS	Bacterias	Detección del dominio C o KS

presentan 13 y 11 grupos de genes que codifican para NRPS, respectivamente. Entre estos péptidos no ribosomales se encuentran: la luminmicina A, una molécula con actividad citotóxica en células de carcinoma humano; las bicornutinas A1/A2, que presentan actividad antibacteriana y antifúngica contra *Erwinia amylovora*, causante del “fuego bacteriano” –un importante patógeno de plantas– y contra el hongo *Phytophthora nicotianae*, causante de la enfermedad del “tizón” en cultivos de cebolla, papa, tomate y algodón; así como las odilorhabdinas, con actividad antibiótica, que se unen a la subunidad pequeña del ribosoma en un sitio que no reconocen otros antibióticos. Por ello, estas NRPS son activas contra algunas bacterias patógenas multirresistentes a antibióticos; otras, como las xenocoumacinas, exhiben una amplia actividad antimicrobiana en algunas enterobacterias y en bacterias multirresistentes, como *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*.

Por otro lado, diversos estudios muestran que el género *Streptomyces* son bacterias que constituyen uno de los mayores productores de compuestos bioactivos. Por eso, se realizó la comparación de los genomas del género *Streptomyces* y los genomas de *Photorhabdus* y *Xenorhabdus*, estudio que demostró que *Streptomyces* presenta un mayor número de grupos de genes biosintéticos. Sin embargo, *Photorhabdus* y *Xenorhabdus* presentan un número más elevado de grupos de genes que codifican para NRPS, lo que representaría una mayor posibilidad de producir péptidos no ribosomales (véase la **Figura 3**). Este tipo de análisis es importante y necesario para comprender la ecología química, tan diversa en estos organismos, por lo que es necesario utilizar herramientas bioinformáticas de frontera, así como enfocar los estudios a biomoléculas no convencionales. La complejidad del estilo de vida de *Photorhabdus* y *Xenorhabdus*, es decir, la patogenicidad que exhiben en insectos y la

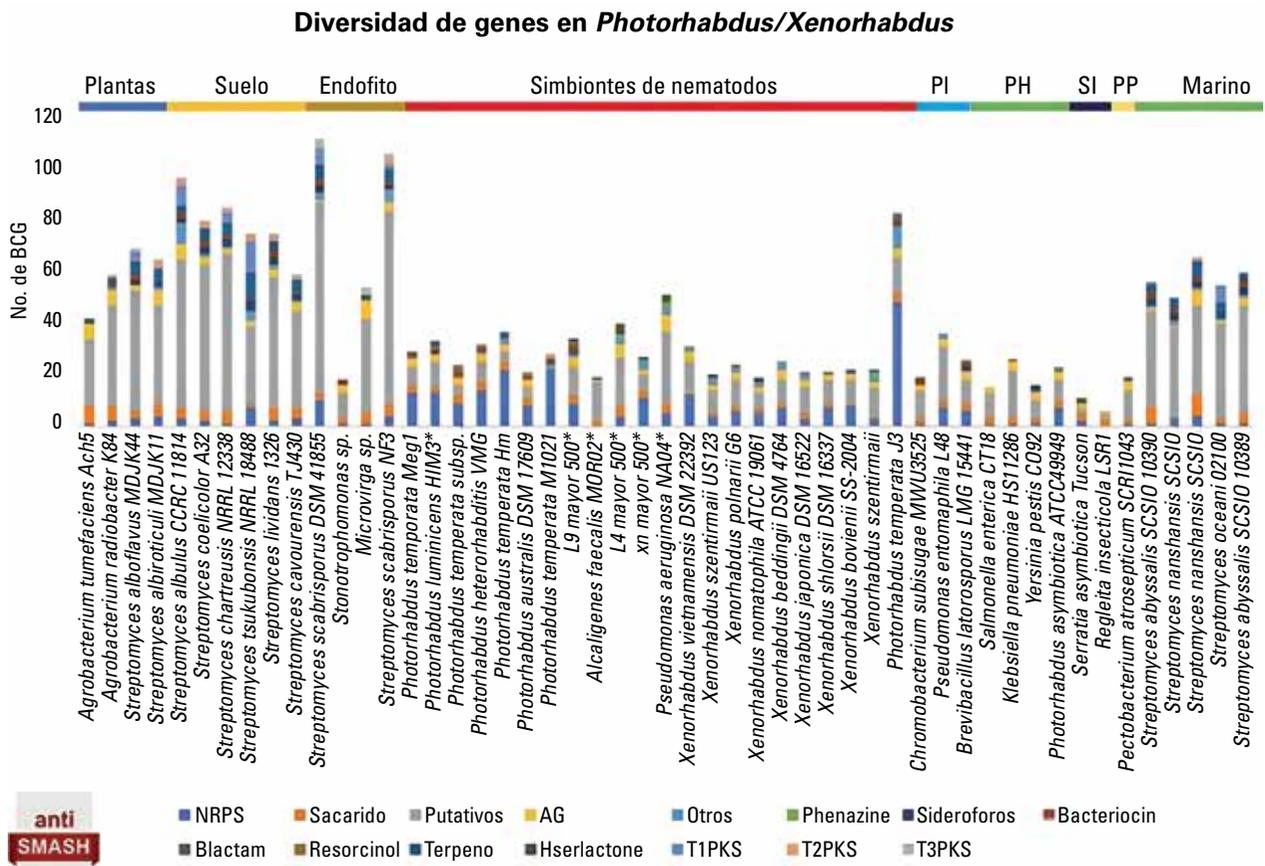


Figura 3. Diversidad de NRPS en *Photorhabdus* y *Xenorhabdus*. Tomado de Bueno-Hernández, 2021.

simbiosis con el nematodo, puede aprovecharse para el descubrimiento de otros compuestos importantes con futuras aplicaciones en medicina, veterinaria y agricultura, como se ha sugerido en otros estudios.

Rosalba Salgado-Morales

Laboratorio de Estudios Ecogenómicos, Centro de Investigación en Biotecnología CelB, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
rosalba.salgado@docentes.uaem.edu.mx

Luis Enrique Rojas-Espinoza

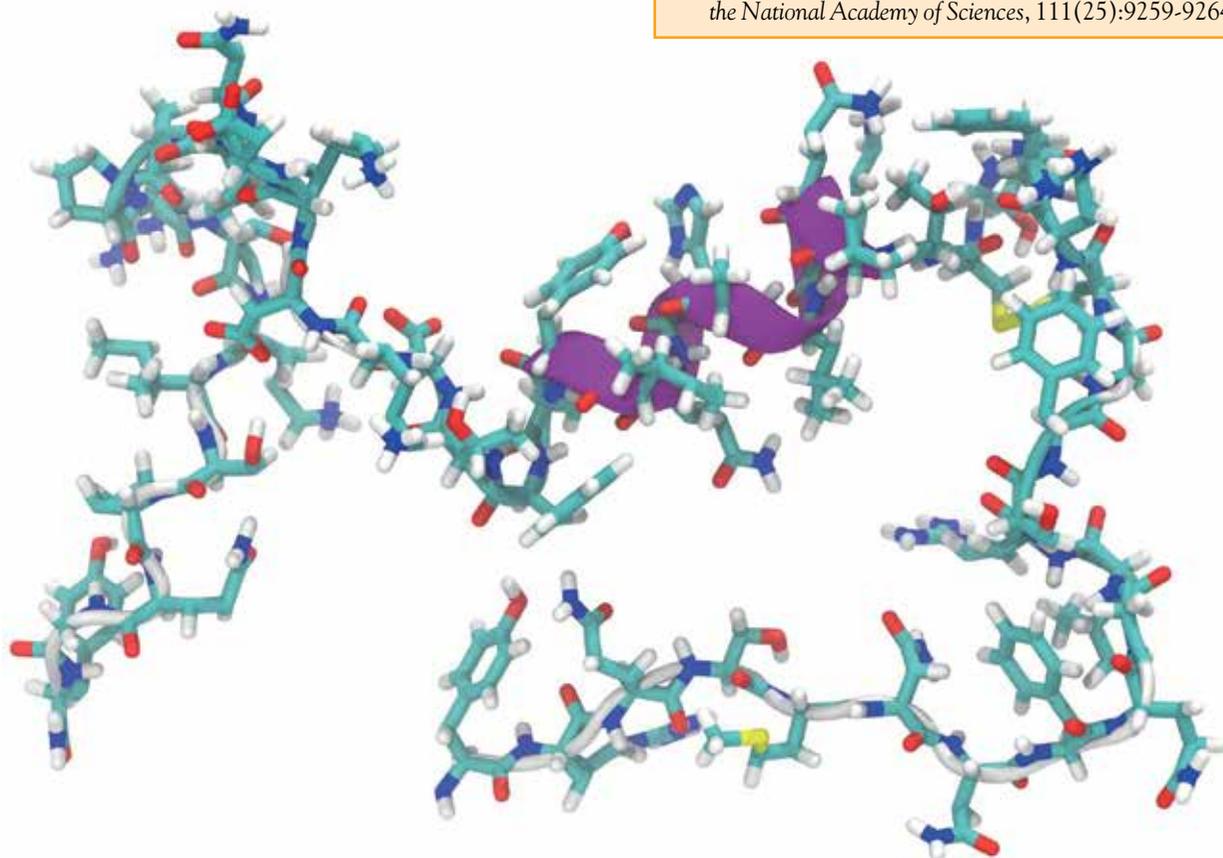
Centro de Ciencias Genómicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
rojases@ccg.unam.mx

Édgar Dantán-González

Laboratorio de Estudios Ecogenómicos, Centro de Investigación en Biotecnología CelB, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
edanta@uaem.mx

Referencias específicas

- Ackerley, D. F. (2016), "Cracking the Nonribosomal Code", *Cell Chemical Biology*, 23(5):535-537.
- Blin, K., S. Shaw, A. M. Kloosterman, Z. Charlop-Powers, G. P. van Wezel, M. H. Medema y T. Weber (2021), "AntiSMASH 6.0: improving cluster detection and comparison capabilities", *Nucleic Acids Research*, 49(W1):W29-W35.
- Bueno-Hernández, B. (2021), *Genómica estructural para el análisis de péptido sintetasas no ribosomales en bacterias simbióticas de organismos patógenos*, tesis de maestría en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Izoré, T., Y. T. Candace Ho, J. A. Kaczmarek, A. Gavriliidou, K. H. Chow *et al.* (2021), "Structures of a non-ribosomal peptide synthetase condensation domain suggest the basis of substrate selectivity", *Nature Communications*, 12:2511.
- Tobias, N. J., H. Wolff, B. Djahanschiri, F. Grundmann, M. Kronenwerth *et al.* (2017), "Natural product diversity associated with the nematode symbionts *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*", *Nature Microbiology*, 2(12):1676-1685.
- Wang, H., D. P. Fewer, L. Holm, L. Rouhiainen y K. Sivonen (2014), "Atlas of nonribosomal peptide and polyketide biosynthetic pathways reveals common occurrence of nonmodular enzymes", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25):9259-9264.



ADN extracelular, ¿benéfico o dañino para la supervivencia de las plantas?

El ADN extracelular es una molécula presente en una gran cantidad de ecosistemas terrestres y acuáticos. Se ha encontrado que participa en la formación de biopelículas de bacterias y en procesos inflamatorios en animales. Nuevas investigaciones sugieren que esta molécula puede utilizarse para formular bioherbicidas y vacunas para plantas, dependiendo de la dosis y forma de aplicación.

Introducción

Todos los seres vivos somos muy diferentes, pero al mismo tiempo compartimos una característica en común: albergamos en el interior de nuestras células el ácido desoxirribonucleico, mejor conocido como ADN. El ADN es la molécula responsable de la transferencia de la información genética en todas las especies, pues contiene las instrucciones para definir cómo será la forma de nuestro cabello, color de ojos, altura, entre otras características físicas; es decir, contiene las instrucciones para que un organismo se desarrolle, sobreviva y se reproduzca. Desde que Watson y Crick publicaron su estructura en 1953, el ADN ha sido descrito como una hélice de doble cadena, complementaria y antiparalela. Si quisiéramos imaginar su forma, basta con observar dos filamentos de hilo enrollados entre sí, los cuales al separarse dibujan una trayectoria helicoidal (**Figura 1**).

Hoy en día, el ADN es una molécula famosa debido a que sus características y manipulación han permitido el desarrollo de áreas como la biología molecular y la biotecnología. Además, la investigación enfocada en esta molécula ha descrito las diferentes funciones que tiene, así como una nueva forma en la que el ADN desempeña un papel importante en los ecosistemas. A esta nueva forma se le conoce como ADN extracelular (eADN), y hace referencia al ADN que originalmente se encontraba al interior de la célula, pero que, por procesos de ruptura de las células o muerte celular, se liberó al exterior de la célula (Nagler y cols., 2018). En organismos pluricelulares (por ejemplo, plantas y mamíferos), eventos como las infecciones, heridas, quemaduras u otros que involucren un daño de tejidos, y por



Figura 1. Hilos enrollados entre sí simulan la estructura del ADN y su giro helicoidal.

lo tanto de células, pueden provocar la liberación de ADN; cuando el ADN se libera puede acumularse en diferentes ambientes, como suelos, el cuerpo humano y en ecosistemas marinos y acuáticos (Figura 2).

Debido a que se ha encontrado eADN en todos los tipos de ambientes y ecosistemas, podemos decir que el fenómeno de ocurrencia y acumulación del eADN es natural. Hace unos años, sin embargo, algunos investigadores notaron la importancia tanto biológica como ecológica de la presencia del eADN. Por ejemplo, el eADN encontrado en el cuerpo humano es un elemento de las trampas contra patógenos

que crean nuestras células inmunes para prevenir infecciones. De igual manera, se ha demostrado que el eADN es vital para la formación de las biopelículas bacterianas sobre distintas superficies; esto beneficia a las poblaciones microbianas en su supervivencia y estabilización sobre diferentes ecosistemas. En el suelo, el eADN tiene un papel importante al formar una capa en la punta de las raíces de las plantas, para ayudarlas a prevenir el ataque de patógenos.

Más recientemente, se ha demostrado que altas concentraciones de eADN en un ambiente determinado pueden inhibir el desarrollo y crecimiento de distintos organismos, como plantas, hongos y bacterias. Por otro lado, bajas concentraciones del mismo pueden ayudar en la supervivencia vegetal, al mejorar el sistema de defensa contra patógenos. Dada la gran relevancia del eADN, este artículo presenta información sobre las investigaciones y aplicaciones potenciales del eADN en la agricultura, así como una perspectiva de su uso para la activación de microorganismos benéficos del suelo.

■ El eADN: un patrón molecular reconocido por las plantas

■ Las plantas son organismos que no pueden moverse de un lugar a otro para evitar ser atacadas por

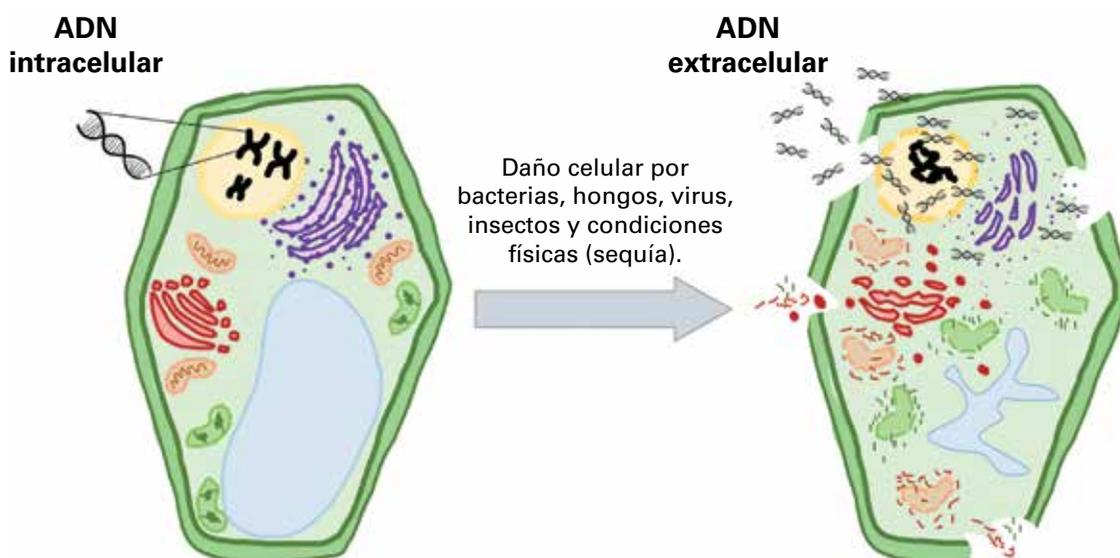


Figura 2. Liberación de ADN en una célula vegetal. El ADN intracelular se fragmenta y libera debido a procesos que dañan la integridad celular, y se convierte en ADN extracelular.

insectos, animales o microorganismos patógenos. En su lugar, las plantas han desarrollado mecanismos que les permiten reconocer diferentes tipos de moléculas que provienen de aquellos organismos que las atacan, para activar su sistema de defensa y sobrevivir a todos esos peligros; a estas moléculas se les conoce como patrones moleculares asociados a patógenos (PMAP), y pueden ser de diferente naturaleza química, como proteínas, polisacáridos o lípidos.

También existe una categoría para aquellas moléculas que provienen de la misma planta que está siendo atacada; esto es, hay moléculas que suelen encontrarse al interior de la célula desarrollando funciones normales, pero que al momento de un daño salen de la célula y pueden ser reconocidas como un patrón molecular; a estas moléculas se les conoce como patrones moleculares asociados a daño (PMAD). Como su nombre lo dice, los PMAD le indican a una célula vegetal que está siendo dañada por algún tipo de agresor; es decir, alertan en el caso de un ambiente altamente hostil. El eADN es un PMAD importante debido a que se ha demostrado que puede alertar a células vecinas del peligro circundante; es decir, actúa como una señal de peligro clave en organismos de la misma especie. Recientemente, se ha revelado que el eADN también tiene influencia entre organismos de diferentes especies. De esta manera, el eADN puede colocarse en ambas categorías, como un PMAP o un PMAD. En otras palabras, si proviene de microorganismos patógenos, la planta lo reconoce como un PMAP; pero si proviene de la misma célula vegetal, ésta lo reconoce como un PMAD. En ambos casos la planta entra en un estado de alerta; es decir, se defiende (Figura 3).

Los investigadores han observado que el eADN participa como un patrón molecular en las plantas y activa diferentes mecanismos que les permiten defenderse. Hasta el momento se sabe que el eADN puede reconocerse sobre la membrana de las células vegetales, o bien entrar en ellas para activar diferentes mecanismos (Chiusano y cols., 2021). Uno de los mecanismos más importantes es la activación de enzimas antioxidantes, las cuales son proteínas que disminuyen la cantidad de las especies reactivas del oxígeno (ERO), debido a que estas últimas son

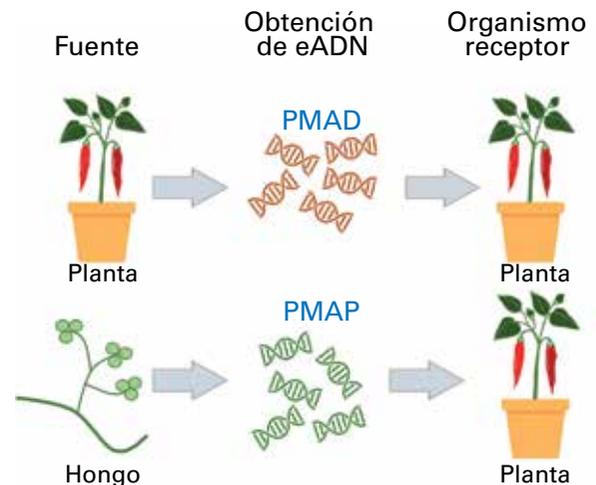


Figura 3. El eADN puede ser reconocido como un patrón molecular asociado a daños (PMAD) o a patógenos (PMAP), dependiendo de la fuente de la que provenga. En ambos casos el organismo receptor podrá activar su sistema de defensa.

sustancias tóxicas para la célula y provocan deterioro de la pared y membrana celular, así como daños a otros organelos celulares.

■ ■ ■ El eADN como “vacuna de plantas”

Antiguamente, una de las prácticas más usadas para prevenir enfermedades en los cultivos consistía en el uso de una mezcla acuosa de los residuos del mismo cultivo, la cual era asperjada sobre las plantas recién cultivadas como una medida de protección contra patógenos. Estas mezclas vegetales eran tan comunes y efectivas que su uso rápidamente se extendió como una práctica agrícola en todo México. A estas mezclas vegetales se les atribuía una propiedad de “repelencia contra los patógenos”; sin embargo, ahora se sabe que en realidad dichas mezclas contenían diferentes moléculas inmersas, como el eADN, las cuales tenían la capacidad de activar el sistema de defensa de las plantas. La propiedad del eADN como un activador de la defensa vegetal ha quedado verificada a partir de diferentes estudios; en ellos se ha observado que su aplicación puede prevenir el ataque por bacterias patógenas en frijol y maíz (Duran-Flores y Heil, 2018), así como la activación de genes relacionados con el sistema antioxidante en la lechuga (Vega-Muñoz y cols., 2018). Este efecto

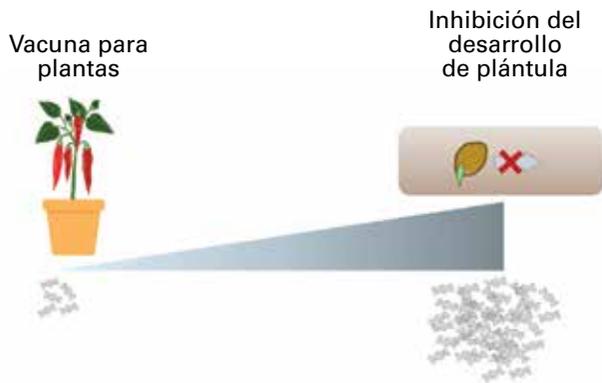


Figura 4. Versatilidad del eADN. El eADN, dependiendo de su fuente, forma de aplicación y dosis, puede tener diferentes efectos. Por ejemplo, en dosis bajas puede activar el sistema de defensa de las plantas y mejorar su crecimiento; por otro lado, a dosis altas puede evitar el desarrollo de plántula o la germinación de su semilla.

ha sido observado por medio del uso del eADN en bajas concentraciones; por ejemplo, se ha usado en mezclas de 2 o 12 mg/L (Figura 4).

Estas investigaciones han propuesto aprovechar el eADN como “vacuna para plantas” porque la efectividad depende de su aplicación preventiva; es decir, antes de que la enfermedad o el daño aparezcan. Dicha propuesta resulta interesante, ya que podría generarse una vacuna para cada tipo de cultivo, fabricada con el eADN del mismo cultivo. Además, el uso de dosis tan bajas facilita en la práctica su obtención y aplicación, y convierte al eADN en una alternativa viable para aplicar sobre las hojas de las plantas y así prevenir el ataque de patógenos en los cultivos (Figura 4).

También se ha observado que la aplicación de una mezcla de eADN proveniente de los microorganismos fitopatógenos *Fusarium oxysporum*, *Phytophthora capsici* y *Rhizoctonia solani*, en plantas de chile, previene que éstas se enfermen gravemente por dichos patógenos (Serrano-Jamaica y cols., 2021). Este hallazgo demuestra nuevamente el efecto protector del eADN cuando se usa de forma preventiva, así como su versatilidad al tener como fuente también a organismos patógenos.

■ El eADN como bioherbicida

■ Como pudimos apreciar, el eADN parece una molécula que provoca sólo resultados positivos cuando in-

teracciona con las células de una planta; sin embargo, un grupo de investigadores observó que los suelos donde había muchos desechos vegetales impedían el crecimiento de nuevas plantas que antes habitaban ese espacio. En dichos suelos se encontró una gran cantidad de eADN que era originario de las plantas de ese lugar. Así pues, los investigadores realizaron estudios en los que expusieron a un gran número de organismos –plantas, hongos y bacterias– a su propio eADN, y encontraron que se inhibía su desarrollo y crecimiento (Figura 4) (Mazzoleni y cols., 2015).

Lo anterior fue un hallazgo muy interesante desde el punto de vista ecológico, ya que dio forma a nuevas investigaciones para conocer cómo es que existe una regulación natural en los suelos, y que dicho proceso está relacionado con la descomposición de los organismos. Por otro lado, también dio un nuevo panorama para demostrar que el eADN podría servir para evitar la germinación de semillas de malezas. A partir de este estudio, muchos investigadores demostraron que ese efecto se observaba en todos los tipos de especies vegetales; es decir, si se obtenía eADN de frijol y se aplicaba sobre semillas de frijol, éstas no lograban germinar (Duran-Flores y Heil, 2018). Dado que el fenómeno pudo comprobarse y replicarse, actualmente algunas empresas se encuentran formulando productos a partir de eADN que puedan ser aplicados en el control de malezas que afectan al desarrollo de los cultivos.

Otros científicos se interesaron por el proceso de inhibición de bacterias y hongos patógenos. Los estudios describen que, de igual manera, esta tecnología podría utilizarse para la creación de productos que impidan el desarrollo de microorganismos patógenos que se encuentran en el suelo. Por ejemplo, un estudio reciente describe el uso del eADN, a una concentración de 500 mg/L, para impedir que proliferara el patógeno *Phytophthora capsici*, el cual afecta gravemente a cultivos como el chile y el jitomate (Ferrusquía-Jiménez y cols., 2022).

■ Nuevos caminos del eADN

■ La gran versatilidad de acción del eADN crea muchas oportunidades para investigar sus aplicaciones,



no sólo en la agricultura, sino también en la medicina; por ejemplo, en el desarrollo de nuevos antibióticos. Otro enfoque interesante que podría tener la aplicación de esta molécula se relaciona con su reconocimiento por los microorganismos benéficos del suelo. Hasta ahora conocemos bien qué pasa cuando interacciona con las plantas y sus raíces, y sabemos que para algunos microorganismos del suelo la presencia del eADN es importante para su propagación y supervivencia; sin embargo, surgen nuevas preguntas: ¿podríamos usar el eADN para activar de forma intencionada a los microorganismos benéficos del suelo?, ¿el eADN aplicado en microorganismos benéficos mejoraría su actividad?, ¿podría usarse esta tecnología para restaurar los suelos agrícolas? Faltarán muchos años para lograr responder estas preguntas; con todo, la constante investigación y el desarrollo científico permitirán ahondar en sus ven-

tajas y limitantes. Así, el conocimiento científico posibilitará que las empresas puedan hacer un uso responsable del eADN y de esta manera solucionar diferentes problemas.

■ ■ ■ Conclusiones

■ El eADN es una molécula ampliamente distribuida por todo del mundo, de la cual se desconocía su relevante función en diferentes ecosistemas. Hoy en día hay una intensa investigación sobre los usos del ADN extracelular para su empleo como un modificador de la respuesta celular, en células tanto animales como vegetales. Por lo tanto, es interesante pensar que puede haber muchas otras moléculas con características tan fascinantes como las del eADN. Existe un largo camino por recorrer para que el eADN sea empleado en sistemas agrícolas o médicos; sin em-

bargo, la investigación apunta al desarrollo de una tecnología eficiente y sustentable. Además, las futuras generaciones tendrán un gran impacto en el avance de este tema y podrán sumar con nuevas investigaciones.

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo en el financiamiento de este trabajo. Además, la maestra Ferrusquía-Jiménez agradece a Conacyt por el financiamiento de sus estudios de doctorado.

Ramón Gerardo Guevara-González

Centro de Investigaciones Aplicadas en Biosistemas, Grupo de Ingeniería en Biosistemas, Universidad Autónoma de Querétaro.
ramon.guevara@uaq.mx

Claudia Gutiérrez-Antonio

Centro de Investigaciones Aplicadas en Biosistemas, Grupo de Ingeniería en Biosistemas, Universidad Autónoma de Querétaro.
claugtez@gmail.com

Noelia Isabel Ferrusquía-Jiménez

Centro de Investigaciones Aplicadas en Biosistemas, Grupo de Ingeniería en Biosistemas, Universidad Autónoma de Querétaro.
nols_nola@hotmail.com

Referencias específicas

- Chiusano, M. L., G. Incerti, C. Colantuono, P. Termolino, E. Palomba *et al.* (2021), “*Arabidopsis thaliana* response to extracellular DNA: Self versus nonself exposure”, *Plants*, 10(8):1744.
- Duran-Flores, D. y M. Heil (2018), “Extracellular self-DNA as a damage-associated molecular pattern (DAMP) that triggers self-specific immunity induction in plants”, *Brain, Behavior, and Immunity*, 72:78-88.
- Ferrusquía-Jiménez, N. I., L. M. Serrano-Jamaica, J. E. Martínez-Camacho, D. Sáenz de la O, A. L. Villagómez-Aranda *et al.* (2022), “Extracellular self-DNA plays a role as a damage-associated molecular pattern (DAMP) delaying zoospore germination rate and inducing stress-related responses in *Phytophthora capsici*”, *Plant Pathology*, 71:1066-1075.
- Mazzoleni, S., F. Carteni, G. Bonanomi, M. Senatore, P. Termolino *et al.* (2015), “Inhibitory effects of extracellular self-DNA: A general biological process?”, *New Phytologist*, 206:127-132.
- Nagler, M., H. Insam, G. Pietramellara y J. Ascher-Jenull (2018), “Extracellular DNA in natural environments: features, relevance and applications”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102:6343-6356.
- Serrano-Jamaica, L. M., E. Villordo-Pineda, M. M. González-Chavira, R. G. Guevara-González y G. Medina-Ramos (2021), “Effect of fragmented DNA from plant pathogens on the protection against wilt and root rot of *Capsicum annuum* L. plants”, *Frontiers in Plant Science*, 11.
- Vega-Muñoz, I., A. A. Feregrino-Pérez, I. Torres-Pacheco y R. G. Guevara-González (2018), “Exogenous fragmented DNA acts as a damage-associated molecular pattern (DAMP) inducing changes in CpG DNA methylation and defence-related responses in *Lactuca sativa*”, *Functional Plant Biology*, 45(10):1065-1072.
- Watson, J. y F. Crick (1953), “Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid”, *Nature*, 171:737-738.

Leticia M. Ochoa-Ochoa, Daniel G. Ramírez Arce y Juan D. Vásquez-Restrepo

Colores, tamaños y formas: la diversidad de los reptiles de México

Este artículo ofrece un atisbo al fascinante mundo de la ecología funcional utilizando como ejemplo los reptiles escamados de México. Partimos de una breve introducción a algunos conceptos de la ecología funcional y de cómo estos conceptos son esenciales para entender la manera en que se conforman las comunidades o grupos de organismos que interactúan compartiendo un espacio y tiempo. A continuación, se ofrecen datos específicos de reptiles de México a manera de ejemplo.

Los reptiles son un grupo fascinante de vertebrados terrestres y, además, el más diverso entre éstos en la actualidad. A la fecha se han descrito poco más de 12 200 especies en todo el mundo y México no se queda atrás, ya que es el segundo país más diverso en reptiles, con 1 023 especies.¹ De todas ellas, más del 50 % son endémicas; es decir, más de la mitad de las especies se distribuyen únicamente dentro de los límites políticos del país y en ningún otro lugar.

Los reptiles tienen una enorme variedad de colores, tamaños, formas y estilos de vida que han maravillado a científicos, naturalistas y aficionados durante siglos (**Figura 1**). Por ejemplo, algunos reptiles, como las víboras de cascabel (*Crotalus* spp.), poseen coloraciones crípticas –también llamadas camuflaje– gracias a las cuales el animal se mezcla con el fondo mediante una imitación del color y patrón, mientras que otras serpientes, como las coralillo (*Micrurus* spp.), poseen coloraciones aposemáticas –colores llamativos que dan un mensaje visual de peligro–, y cada una de estas coloraciones sirve a propósitos específicos.

La diversidad de formas, tamaños y colores no sólo se da entre especies diferentes, sino también dentro de poblaciones de una misma especie, algo a lo que los biólogos llamamos variación geográfica. La variación geográfica es el resultado de la interacción entre las poblaciones y el ambiente donde viven, debido a

¹ Véase *The Reptile Database*: <<http://www.reptile-database.org>>, consultado en diciembre de 2024.

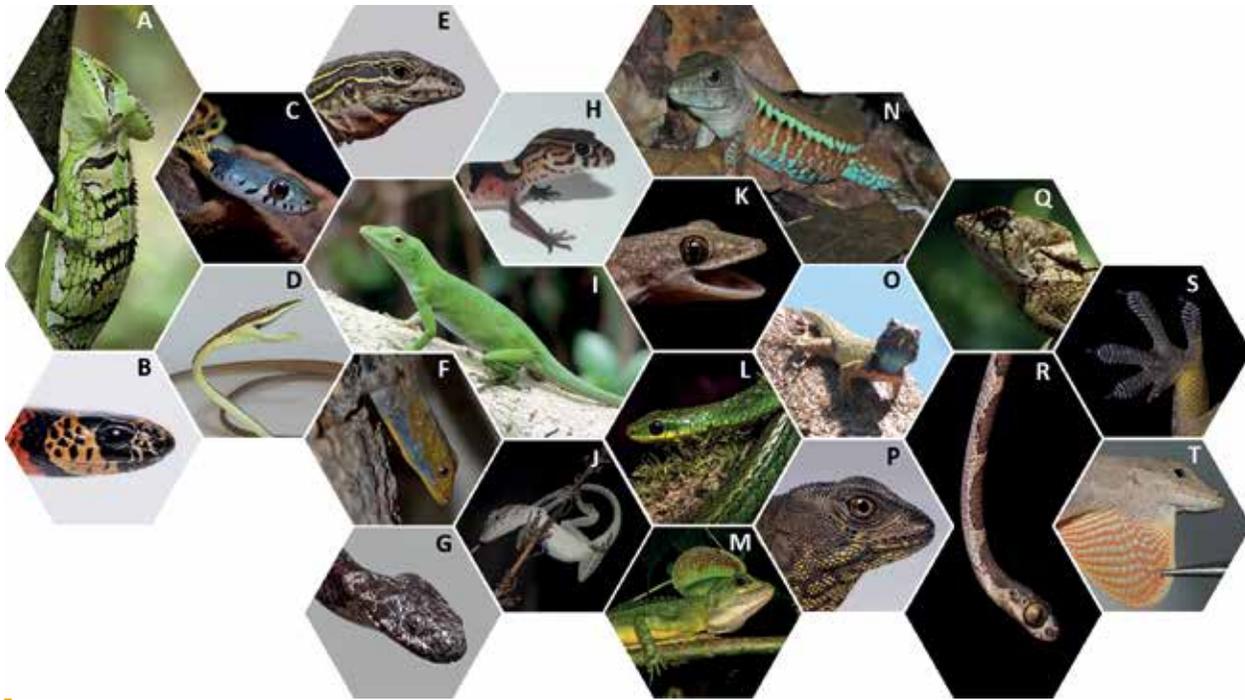


Figura 1. La diversidad de tamaños y formas que representan la gran variación entre los reptiles. A = *Laemactus serratus*, B = *Lampropeltis micropholis*, C = *Thamnophis cyrtopsis*, D = *Oxybelis microphthalmus*, E = *Aspidoscelis gularis*, F = *Gonatodes albogularis*, G = *Sibon nebulatus*, H = *Coleonyx elegans*, I = *Anolis biporcatus*, J = *Anolis nebulosus*, K = *Hemidactylus garnotii*, L = *Chironius monticola*, M = *Basiliscus galeritus*, N = *Holcosus undulatus*, O = *Sceloporus melanorhinus*, P = *Enyalioides groi*, Q = *Corytophanes cristatus*, R = *Imantodes cenchoa*, S = *Hemidactylus garnotii*, y T = *Anolis Boulengerianus*. Fotos: Diana L. Fuentes de la Rosa (A, Q, T), Luis Fernando Hidalgo Licona (C), Leticia M. Ochoa-Ochoa (I), Daniel G. Ramírez Arce (D, H, J, N, O) y Daniel Vásquez Restrepo (B, E, F, G, K, L, M, P, R, S).

que las condiciones ambientales no son homogéneas y cambian a lo largo del espacio geográfico. Por lo general, el efecto de estas interacciones tarda varias generaciones en hacerse visible, pero recientemente se ha observado que algunas especies pueden responder con relativa rapidez; por ejemplo, a las **modificaciones antrópicas**, las cuales en una escala evolutiva tienen muy poco tiempo. Éste es el caso de la lagartija *Aspidoscelis costatus*, en la que se han observado cambios de coloración asociados a ambientes urbanos (Gómez-Benítez y cols., 2020), o algunas especies del género *Anolis*, que presentan cambios en la forma de sus patas relacionados con el uso de sustratos artificiales (Winchell y cols., 2016).

Además de los aspectos morfológicos, es decir, las características físicas, existen otros aspectos, como los fisiológicos –por ejemplo, cuánta energía necesitan o el tipo de reproducción que tienen–, ecológicos –como los tipos de dieta–, y conductuales –cuándo y cómo comen, si son territoriales, cómo termorregulan

o incluso si **hibernan** o **estivan**–. Todas estas características en conjunto forman los rasgos funcionales de una especie, en general, llamados solamente rasgos (*traits*). Así pues, un rasgo funcional es cualquier característica medible de los organismos que interactúa con el ambiente y tiene un efecto en la adecuación, lo que se traduce en su influencia sobre la capacidad de dejar descendencia fértil.

La diversidad de rasgos en un ecosistema refleja el número de funciones realizadas por el grupo de organismos vivos que allí se encuentran, y por lo general existe redundancia funcional, lo que significa que más de una especie puede tener la misma función. Cuando esto sucede, las especies se pueden clasificar en grupos funcionales; y, en teoría, cada grupo funcional dentro de una comunidad tiene un límite en el número de especies o individuos que puede incluir. Hay que tener en cuenta que la clasificación de un grupo funcional depende de los rasgos funcionales medidos, por lo que ésta puede ser muy variable e ir desde agrupaciones generales –como hablar de

Hibernación

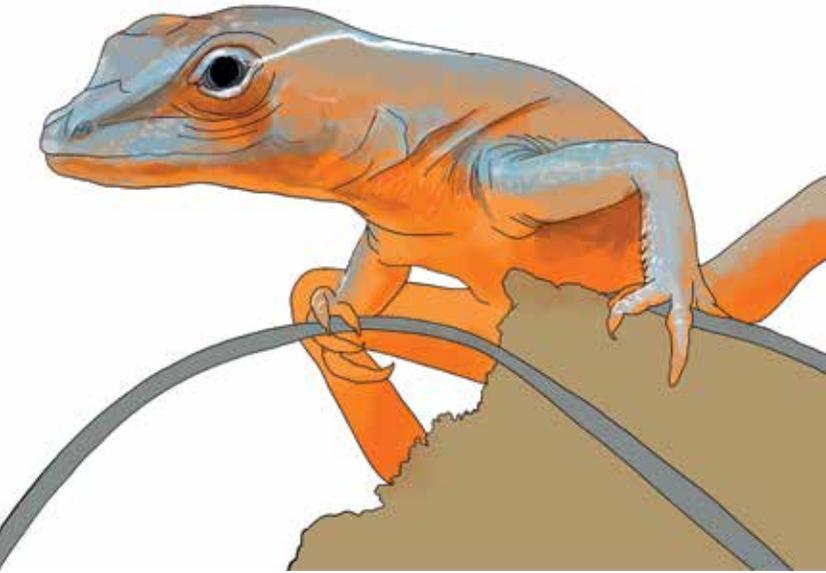
Cuando los organismos entran en un letargo en el cual presentan un estado de metabolismo reducido; común en especies que habitan lugares donde hay un período del año con temperaturas bajas, generalmente sin limitación de humedad.

Estivación

Cuando los organismos entran en un letargo en el cual presentan un estado de metabolismo reducido o deprimido; común en sitios donde hay una temporada seca y caliente.

Modificación antrópica

Todo cambio generado en un ecosistema por acción directa e indirecta de las actividades humanas.



animales insectívoros o herbívoros— hasta agrupaciones muy específicas, como lagartijas pequeñas, arborícolas, diurnas, vivíparas con cuidado parental, etcétera. El principio base de la estructuración de las comunidades es que las especies que conviven en un mismo espacio y tiempo evitan la competencia y se reparten los recursos. Por ejemplo, una comunidad de reptiles no puede estar formada únicamente por especies carnívoras del mismo tamaño, ya que competirían entre sí, lo cual resultaría en el desplazamiento de especies. De modo que en una comunidad siempre se van a encontrar especies de distinto tamaño y que aprovechen distintos tipos de recursos. No obstante, cuando las condiciones ambientales de un sitio son muy particulares, las especies van a tender a compartir ciertas características. Por ejemplo, en las regiones áridas es común encontrar lagartijas con características funcionales semejantes que les permiten subsistir en condiciones de escasez de agua y humedad (Gonçalves-Sousa y cols., 2022). Por lo tanto, la composición de rasgos funcionales puede ayudarnos a entender los procesos que influyen en la estructuración de una comunidad, como la competencia o los filtros ambientales.

La diversidad funcional cuantifica la diversidad de los rasgos de las especies que conforman una comunidad, y se sabe que es fundamental en la estructuración de la misma (Kraft y cols., 2015). Por

lo anterior, la diversidad funcional es un aspecto crucial para comprender el mantenimiento del ecosistema, así como la respuesta de las comunidades a los cambios ambientales, ya sean de origen natural o antrópico. A menudo se considera que entre más funciones realizadas o más grupos funcionales existen, más complejos son los ecosistemas. Por el contrario, entre menos complejo es un sistema, hay menos grupos funcionales. Por ejemplo, un estudio en las selvas bajas caducifolias del Pacífico mexicano que utilizó un enfoque de diversidad funcional mostró cómo algunas especies de talla grande, dieta carnívora y hábitos específicos (*Heloderma horridum*) no se encontraban en sitios perturbados por actividades humanas, y la diversidad funcional en estos sitios fue más baja que en sitios conservados, los cuales tienden a ser más complejos (Berriozabal-Islas y cols., 2017).

Existen también ciertas “reglas” que se dan al interior de las comunidades, las cuales, al irse comprobando en distintos lugares o grupos de organismos, se han ido generalizando. A éstas se les llama **reglas ecogeográficas** y describen el comportamiento general, así como las variaciones en los rasgos funcionales de un taxón a través de gradientes geográficos. Por ejemplo, se ha podido observar que, dentro de las comunidades, la mayoría de las especies son de tamaño pequeño a mediano (medido como masa corporal), y se puede observar que los escamados —el grupo en el que están las lagartijas y las serpientes—, que representan poco más del 70 % de las especies del país, no son la excepción (Figura 2). Sin embargo, para México, parece ser que este patrón aparentemente generalizado entre los escamados está principalmente dado por las serpientes y los iguánidos (iguanas, camaleones, agámidos, frinosomátidos, entre otros), ambos grupos altamente **especiosos**, que para el caso de la gráfica presentada representan el 48.45 % y 27.95 % correspondientemente de los datos analizados (Figura 3).

Otra de estas reglas ecogeográficas tiene que ver con la relación entre el tamaño corporal y el área geográfica que ocupa una especie, y dice que entre mayor sea la masa mayor será el área de distribución. Por ejemplo, una explicación ecológica que ha sido propuesta tiene que ver con el metabolismo,

Reglas ecogeográficas

Conjunto de patrones geográficos, generalizables o predecibles, que se observan en la distribución de las especies o sus características, y que son el resultado de la interacción con su entorno.

Grupos especiosos

Referente a un grupo biológico con un alto número de especies.

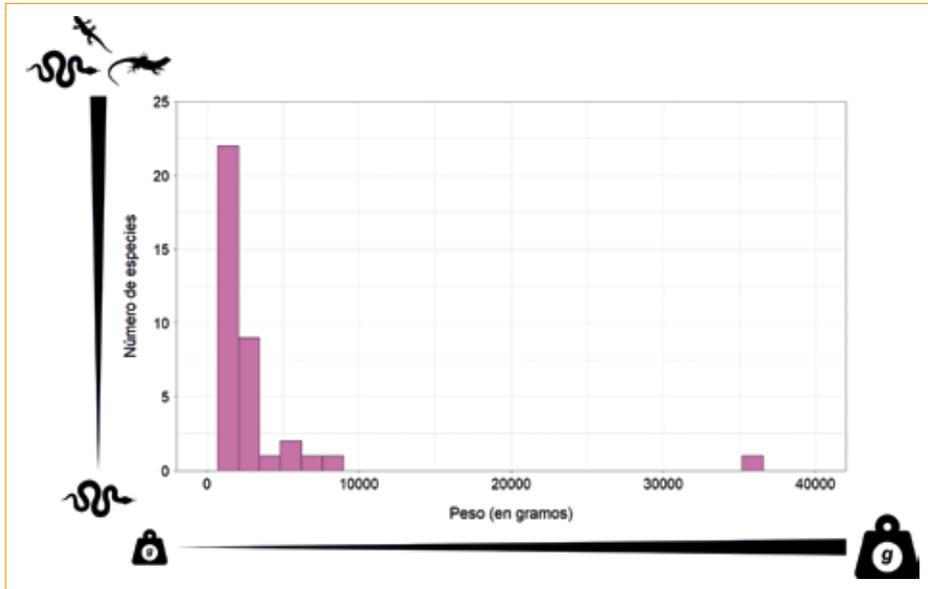


Figura 2. Distribución de los tamaños corporales de los reptiles escamados (serpientes y lagartijas) en México, medidos en términos de masa (en gramos).

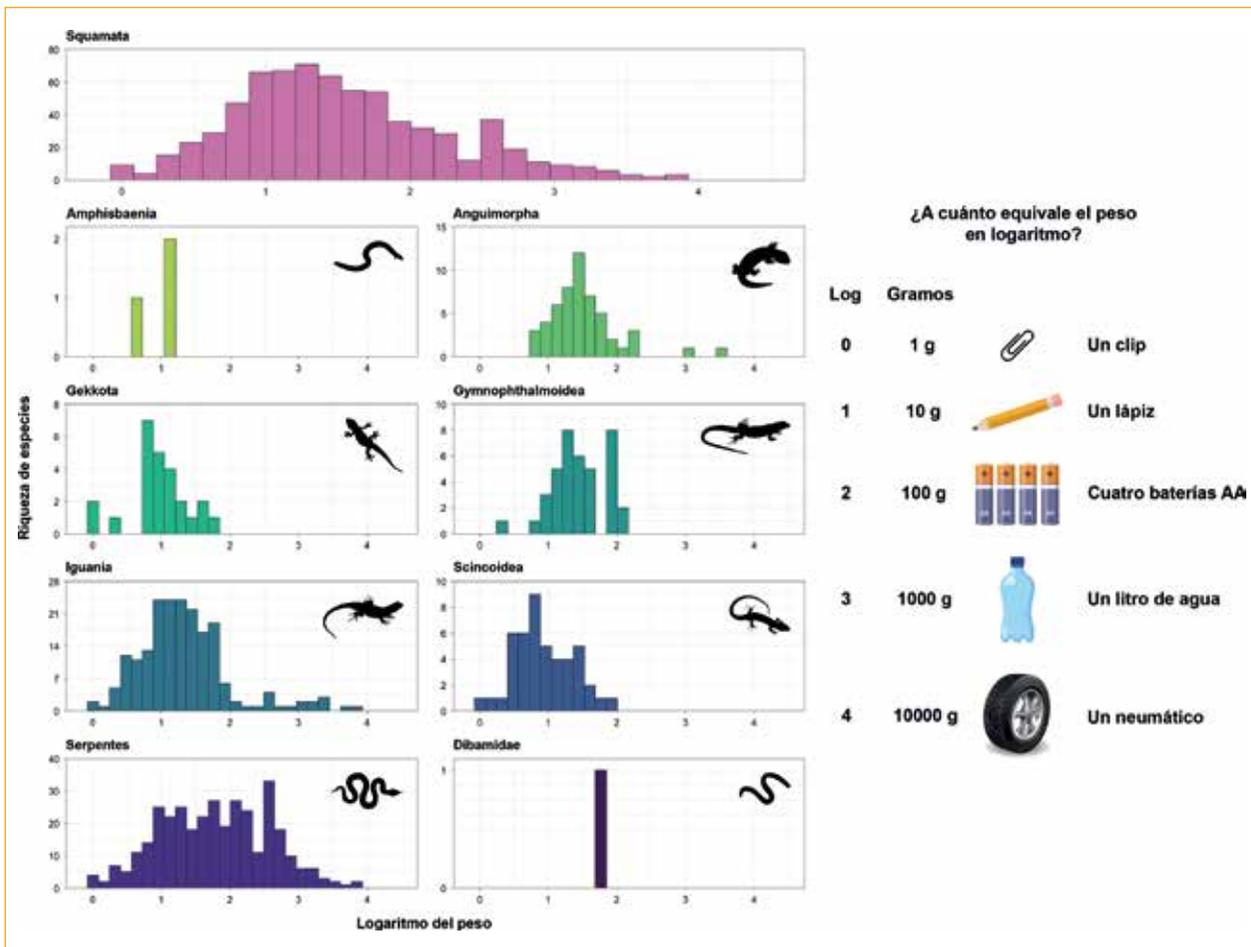


Figura 3. Distribución de los tamaños corporales de los reptiles escamados (serpientes y lagartijas) en México por grupo taxonómico, medidos como el logaritmo del peso (en gramos). Debido a la gran variación en el peso, es necesario transformar los datos a una escala logarítmica.

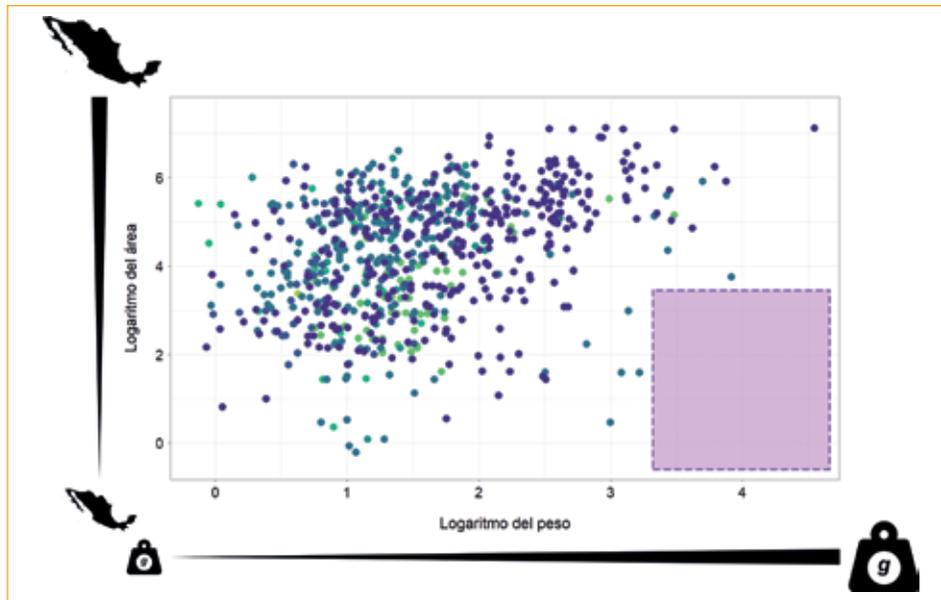


Figura 4. Relación entre el logaritmo del peso (en gramos) y el área de distribución (en km²) de los reptiles escamados (serpientes y lagartijas) en México. El recuadro morado muestra la ausencia de especies con una masa corporal muy grande y un área de distribución muy pequeña.

pues animales más grandes necesitan más alimento para mantener sus funciones y por tanto requieren más espacio para buscarlo; otra indica que entre más grande sea un organismo más fácilmente se desplaza, por lo que le es posible alcanzar lugares más lejanos. Entonces hay limitaciones fisiológicas que dicen que no puede haber animales muy grandes con áreas de distribución muy pequeñas (Figura 4). Esta “regla” parece cumplirse a diferentes escalas, como es el caso de los escamados de México. Una particularidad de esta relación tamaño-área tiene que ver con un espacio “prohibido” en términos ecológicos (véase el recuadro morado en la Figura 4), espacio que parece no ser posible en la naturaleza, y no sólo para reptiles. Todo esto que hemos mencionado forma parte del área de estudio de la biogeografía funcional, es decir, el análisis de los patrones, causas y consecuencias de la distribución geográfica de la diversidad de formas y funciones de las especies, a través de diferentes niveles de organización (Violle y cols., 2014).

Recientemente se ha utilizado el aspecto funcional para explorar patrones de diversidad y tratar de responder preguntas sobre dónde, cómo y por qué las especies están donde están. El aspecto funcional también es un enfoque creciente que busca

comprender los patrones de pérdida de biodiversidad (Bolochio y cols., 2020), porque consiste en utilizar características de las especies que interactúan con el ambiente, las cuales están sujetas a presiones de selección y tienen respuestas diferenciales a las perturbaciones ambientales. Por ejemplo, en México se ha analizado cómo cambia la composición de especies de lagartijas y sus rasgos funcionales ante la presencia de distintos tipos de vegetación (Peña-Joya y cols., 2020), o distintos tipos de uso de suelo, donde se mostró que en sitios perturbados no se encontraban algunas especies de talla grande, dieta carnívora y hábitos específicos, como el monstruo de Gila (*Heloderma horridum*), por lo cual la diversidad funcional fue más baja que en sitios conservados (Berriozabal-Islas y cols., 2017).

Así pues, los rasgos funcionales nos pueden dar pistas sobre cuáles especies toleran qué condiciones y a la vez nos permiten estimar las consecuencias a nivel funcional de la pérdida de especies con roles ecológicos clave —expresados como funciones—. Tanto es así que cada vez hay más ecólogos que argumentan la importancia de conservar “funciones” en lugar de especies, lo que posibilita llegar a conclusiones más generales y realizar mejores prediccio-

nes. Es importante enfatizar que realizar análisis para entender el funcionamiento de los ecosistemas a través de la diversidad funcional se puede aplicar, y de hecho se hace con otros grupos de seres vivos, como plantas, insectos y, por supuesto, otros vertebrados.

El análisis de la diversidad funcional de reptiles es una rama creciente dentro de la herpetología y es esencial porque, si se logra dilucidar cómo las funciones determinan la estructura de las comunidades, se podrán generar acciones de manejo específicas que contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas.

Esta investigación fue apoyada por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (PAPIIT-DGAPA, UNAM) a través del proyecto IN22032.

Leticia M. Ochoa-Ochoa

Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera", Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

leticia.ochoa@ciencias.unam.mx

Daniel G. Ramírez Arce

Posgrado en Ciencias Biológicas y Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera", Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

daniel.ramiz10@gmail.com

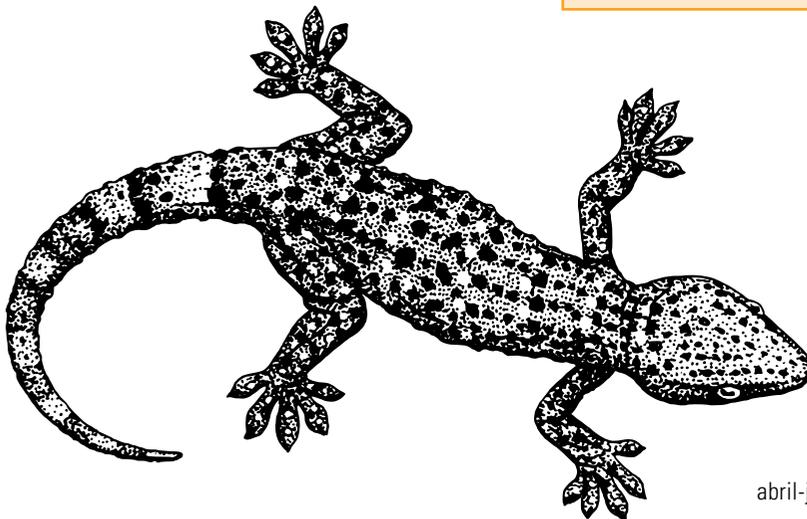
Juan D. Vásquez-Restrepo

Posgrado en Ciencias Biológicas, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

dvasquez@princeton.edu

Referencias específicas

- Berriozabal-Islas, C., L. M. Badillo-Saldaña, A. Ramírez-Bautista y C. E. Moreno (2017), "Effects of habitat disturbance on lizard functional diversity in a tropical dry forest of the Pacific Coast of Mexico", *Tropical Conservation Science*, 10:1-11.
- Bolochio, B. E., J. N. Lescano, J. M. Cordier, R. Loyola y J. Nori (2020), "A functional perspective for global amphibian conservation", *Biological Conservation*, 245:108572.
- Gómez-Benítez, A., O. Hernández-Gallegos, B. R. Lovell, P. Kadia y J. M. Walker (2020), "Color pattern and body size variation in live *Aspidoscelis costatus costatus* (Squamata: Teiidae) from a protected enclave in Southern Mexico", *Herpetological Conservation and Biology*, 15(2):335-349.
- Gonçalves-Sousa, J. G., R. de Fraga, B. S. Menezes, D. O. Mesquita y R. W. Ávila (2022), "Riverine barrier and aridity effects on taxonomic, phylogenetic and functional diversities of lizard assemblages from a semi-arid region", *Journal of Biogeography*, 49:1021-1033.
- Kraft, N. J. B., P. B. Adler, O. Godoy, E. C. James, S. Fuller y J. M. Levine (2015), "Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor", *Functional Ecology*, 29:592-599.
- Peña-Joya, K. E., F. G. Cupul-Magaña, F. A. Rodríguez-Zaragoza, C. E. Moreno y J. Téllez-López (2020), "Spatio-temporal discrepancies in lizard species and functional diversity", *Community Ecology*, 21:1-12.
- Vidan, E., M. Novosolov, A. M. Bauer, F. Castro Herrera, L. Chirio *et al.* (2019), "The global biogeography of lizard functional groups", *Journal of Biogeography*, 46(10):2147-2158.
- Violle, C., P. B. Reich, S. W. Pacala, B. J. Enquist y J. Kattge (2014), "The emergence and promise of functional biogeography", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(38):13690-13696.
- Winchell, K. M., R. G. Reynolds, S. R. Prado-Irwin, A. R. Puente-Rolón y L. J. Revell (2016), "Phenotypic shifts in urban areas in the tropical lizard *Anolis cristatellus*", *Evolution*, 70(5):1009-1022.



Cannabis: el tránsito de una planta utilitaria a una mágica

Aunque hoy en día las plantas de cannabis (*Cannabis sativa* L.) se reconocen principalmente por sus efectos psicoactivos, el primer interés humano en ellas se debió a sus propiedades alimenticias y textiles. Los efectos estimulantes y medicinales del cannabis no fueron descubiertos sino hasta después de su domesticación y cultivo, lo que cambió de manera radical la percepción respecto a sus usos.

Una de las muestras más notables de la capacidad humana para modificar su entorno es la domesticación de los seres vivos. La domesticación consiste en modificar las características de plantas y animales silvestres con el fin de obtener diversos beneficios a partir de ellos, entre los que se incluye el suministro de alimentos, materiales, compañía o fuerza de trabajo. Muchas de las especies de plantas y animales que hoy empleamos con diferentes propósitos fueron domesticadas durante el periodo Neolítico, que se ubica entre los 2000 y 7000 años antes de la era actual, cuando nuestros antepasados fueron estableciéndose gradualmente en asentamientos permanentes, y de esa manera se generalizaron la agricultura y el pastoreo de animales. Para ello, fue necesario disponer de un acervo de plantas y animales domesticados que garantizaran el suministro continuo de alimentos y otros productos.

Ahora bien, el proceso de domesticación tiene dos etapas: la primera consiste en la cuidadosa selección de los ejemplares que reúnen determinados atributos; posteriormente, esos individuos se mantienen y propagan en condiciones controladas y diferentes a las originales en las que se encontraban. En este ambiente un tanto artificial, la selección de los especímenes con las mejores características puede continuar hasta que, a la vuelta de múltiples generaciones, sus rasgos se apartan tanto de los ejemplares originales que llegan a convertirse en una especie distinta.

El impacto de la domesticación se puede observar en la enorme diversidad de tamaños, aspectos y comportamientos de las razas actuales de perros, todas ellas provenientes de los antiguos lobos de las planicies de Europa y Asia central, así



como en las diferencias de tamaños entre las mazorcas del maíz y del teocintle, el pasto silvestre a partir del cual se obtuvo el cultivo.

En las plantas, la domesticación no sólo persigue mejorar atributos morfológicos, sino también aquellos relacionados con el sabor y sus propiedades nutricionales. Estas características son el resultado de la composición química de las plantas. Los componentes químicos que las plantas acumulan también pueden impactar en su desempeño frente al ataque de plagas y enfermedades. De este modo, un proceso de selección encaminado a obtener plantas sobresalientes en estas características, en realidad persigue la selección de individuos con una composición química determinada. Esto es de relevancia para nuestro tema, ya que, en última instancia, la domesticación y selección de plantas con propiedades estimulantes, enervantes o medicinales involucra un proceso de selección química.

Cannabis como alimento y como fuente de fibra para textiles

Una de las plantas mejor conocidas por sus **efectos psicoactivos** es el cannabis o marihuana (*Cannabis sativa* L.; véase la **Figura 1**). La historia de esta planta se remonta a más de 10 000 años y es considerada como la droga recreacional controlada de mayor consumo a nivel mundial por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Este organismo estima que cerca del 4.5 % de la población adulta mundial (equivalente a más de 220 millones de personas) utiliza cannabis de manera regular. En México, los datos más recientes provienen de la Encuesta Nacional de Consumo de Drogas, Alcohol y Tabaco (Encodat), publicada en 2017, y señalan que el 8.6 % de la población mayor de 12 años la consume en alguna medida.

El consumo de algunas plantas como psicotrópicos es muy antiguo. El tabaco y la amapola del opio, por ejemplo, se han empleado con estos fines por miles de años. Más aún, sabemos que los ancestros silvestres de estas plantas eran apreciados por estos efectos y que ésta fue la razón principal para su domesticación. Sin embargo, el interés humano en

Efectos psicoactivos

Alteraciones en el sistema nervioso central causadas por el consumo de sustancias que afectan la percepción, el estado de ánimo, la conciencia y el comportamiento.



Figura 1. Aspecto de las semillas (A) y cogollos secos (B) de *Cannabis sativa*. Las semillas representan la parte comestible de la planta, ya que pueden acumular hasta 25 % de proteína y 30 % de aceites. Los cogollos son el principal sitio de acumulación de tetrahidrocannabinol (THC), el principio psicotrópico de la planta y que solamente se produce en las variedades intoxicantes (marihuana). Las variedades textiles, alimenticias y medicinales (cáñamo) pueden producir cannabinoides de otro tipo. Las diferencias bioquímicas y genéticas entre las variedades definirán el tipo de cannabinoides que producirán.

el cannabis no surgió por estas propiedades, sino por otras más utilitarias. ¿Cuáles fueron esos primeros usos y cuándo se descubrieron sus propiedades estimulantes? Éstas son algunas de las preguntas que rodean a esta interesante planta y que aquí trataremos de contestar.

Se puede trazar el proceso de domesticación del cannabis, así como el de otras plantas, analizando los registros fósiles disponibles y las características del sitio en el que éstos se localizan. Así, numerosos vestigios del cannabis ancestral se han encontrado en una región de más de 40 millones de km², comprendidos desde la zona oriental de Asia hasta Europa central, y que abarcan unos 7 000 años, ubicados en un horizonte de entre 5 000 y 12 000 mil años de antigüedad. El análisis de estos materiales ha revelado importantes diferencias de características entre los encontrados en antiguos asentamientos humanos, respecto a los que provienen de zonas silvestres aledañas, lo que ha permitido establecer cuándo y dónde se inició el proceso de selección y cultivo de esta planta. Dichos estudios proponen que la domesticación del cannabis no fue un evento único, sino que pudo ocurrir en diferentes sitios y momentos históricos, ya que la dispersión en tiempo y espacio de los hallazgos arqueológicos indica que es poco probable que hubiera existido algún tipo de contacto o transferencia cultural entre los grupos humanos que la hicieron.

Ahora bien, independientemente de los sitios y momentos precisos de la domesticación del cannabis, ¿cuáles fueron los atributos que se trataron de mejorar? La principal razón para descartar las propiedades estimulantes es que las plantas silvestres actuales, que se suponen muy similares a las que se introdujeron al proceso de domesticación, no tienen los efectos psicoactivos de la marihuana. No obstante, los fósiles de tallos y semillas hallados en antiguas aldeas, cercanas a sitios en los que también se han encontrado poblaciones silvestres, no sólo son más abundantes, sino que también muestran un mayor calibre. Esto sugiere un proceso deliberado de selección hacia plantas con tallos y semillas más grandes. Se debe hacer notar que las semillas de cannabis son ricas en proteína y aceites, mientras que la corteza de

los tallos puede utilizarse para obtener fibras flexibles y resistentes, muy adecuadas para la elaboración de cuerdas y textiles. Por tanto, es posible concluir que la domesticación del cannabis tuvo como propósito aprovechar sus propiedades nutritivas y textiles. De hecho, grandes extensiones de variedades de cannabis sin efectos psicoactivos, conocidas como cáñamo, se continúan cultivando en diferentes países. En 2019, la producción mundial de cáñamo alcanzó más de 275 000 toneladas.

■ Cannabinoides: ¿cómo surgieron de las plantas silvestres?

■ Antes de discutir los eventos que condujeron al surgimiento del cannabis psicoactivo, mejor conocido como marihuana, conviene detenerse a analizar las causas de estos efectos y los mecanismos biológicos que rigen la aparición de individuos con características diferentes a sus predecesores.

Las plantas de cannabis producen cerca de un centenar de compuestos químicos, genéricamente conocidos como cannabinoides (véase la [Figura 2](#)). Entre todos ellos, solamente uno, el tetrahidrocannabinol

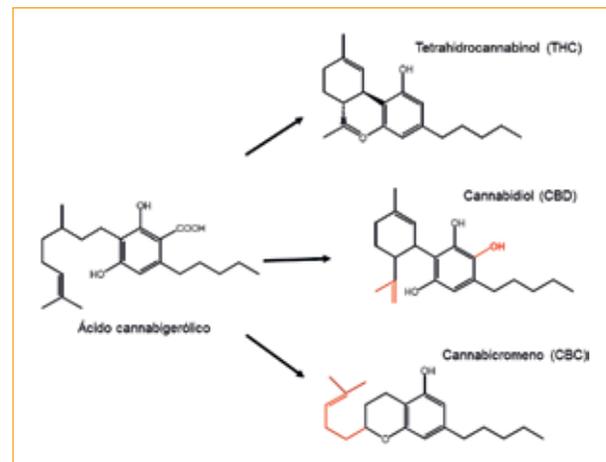


Figura 2. Estructura química de tres cannabinoides. En total se han identificado más de 100 cannabinoides, todos ellos formados mediante diferentes modificaciones químicas de un mismo compuesto: el ácido cannabigerólico. A pesar de sus similitudes, diferentes cannabinoides ejercen diferentes efectos fisiológicos. El THC tiene efectos psicoactivos, mientras que el CBD induce una relajación muscular y el CBC tiene efectos analgésicos, pero ninguno de ellos llega a alterar los estados mentales. En rojo se indican las partes de las moléculas con diferencias estructurales. Estas diferencias son cruciales para determinar si las moléculas se unirán a receptores cerebrales, lo que define los efectos sobre este órgano.

o THC, es el responsable de los efectos narcóticos de la planta. Los demás compuestos de este tipo no producen esta clase de efectos o se acumulan en cantidades tan bajas que resultan insuficientes para lograrlos. Independientemente de sus efectos, todos los cannabinoides comparten una estructura química similar, ya que en el interior de la planta se forman a partir de los mismos compuestos iniciales y siguiendo procesos químicos muy parecidos. Esta similitud se debe a que los genes involucrados en la formación de los diferentes cannabinoides son también muy similares entre sí. De este modo, aunque el cáñamo primitivo no producía el THC necesario para causar efectos estimulantes, sí tenía el potencial genético para hacerlo, dado que sí se formaban pequeñas cantidades de algunos de los otros cannabinoides.

Por otro lado, en algunos casos, pequeños cambios en la conformación de un gen pueden modificar levemente la función que realiza. Estas variaciones, o *mutaciones*, ocurren de manera normal y fortuita a lo largo de la historia generacional de los seres vivos y son la fuerza motriz que mantiene la evolución en marcha. En un entorno silvestre, la selección natural dicta que cuando las características resultantes de esas mutaciones son benéficas, los individuos que las presenten tendrán una ventaja competitiva sobre los demás y, finalmente, sus descendientes se volverán los tipos predominantes en una población. Sin embargo, en las plantas cultivadas la historia es distinta. En este caso, la selección ocurrirá de manera artificial, ya que la prevalencia de los individuos con los nuevos atributos dependerá del agricultor, quien los propagará de manera preferencial solamente si le

traen nuevos beneficios. Las posibles ventajas para la planta se vuelven secundarias al encontrarse bajo una vigilancia permanente. Conjuntando estos escenarios, se ha propuesto que las variedades de cáñamo cultivadas para alimento y fibras sufrieron, de manera espontánea, una mutación que las transformó en los ancestros de la marihuana moderna y que, cuando los agricultores prehistóricos se percataron de los efectos intoxicantes de estas nuevas plantas, se apresuraron a seleccionarlas, con el fin de aumentarlas. Con el tiempo, la importancia de la planta se fue centrando en esos efectos psicotrópicos, dejando de lado sus otros usos.

■ ■ ■ El descubrimiento de una planta mágica

■ Para continuar esta historia, es necesario comentar sobre el posible descubrimiento del cannabis como marihuana. Como ya se mencionó, las semillas eran utilizadas como alimento. No obstante, sin importar si corresponden a plantas de cáñamo o de marihuana, el THC no se acumula en ellas. De este modo, su ingestión no produciría ningún efecto enervante. Estos efectos se concentran en los cogollos, estructuras que corresponden a las partes florales de la planta y en las que, precisamente, ocurre la formación de las semillas. Es muy probable que, durante la extracción de las semillas contenidas en los cogollos, éstos hubieran transferido los compuestos activos a las manos de los antiguos agricultores, lo que permitió el descubrimiento de estas nuevas propiedades. Otra hipótesis señala que la cocción a fuego directo de los cogollos que contenían semillas pudo producir vapores ricos en THC, que fueron inhalados por quienes ejecutaban esas tareas. Es claro que cualquiera de estas posibles explicaciones no cancela la posibilidad de la otra.

Desde tiempos muy tempranos, las plantas mágicas, aquellas que les permitieron a nuestros antepasados asomarse al mundo a través de las ventanas de una percepción sensorial alejada de lo cotidiano, contribuyeron de manera decisiva a la construcción de las cosmovisiones. Por lo mismo, fueron incorporadas como elementos culturales muy valiosos y, con frecuencia, se utilizaban en diversos rituales y ceremonias.



No es fácil establecer las fechas en las que ocurrió el tránsito del cannabis de una planta utilitaria a una mágica. Se estima que la domesticación del cannabis pudo ocurrir aproximadamente hace unos 10 000 o 12 000 años. Por otro lado, los análisis genéticos en los que se comparan las variedades utilizadas como cáñamo con las empleadas como marihuana o con fines medicinales, ricas en cannabidiol o CBD —un compuesto analgésico y relajante muscular sin los efectos embriagantes de la marihuana—, sugieren que estas dos últimas surgieron casi de manera simultánea, hace unos 6 000 años, en el noroeste de China. Curiosamente, en esta misma zona se han encontrado ofrendas mortuorias de barro con residuos de THC, fechadas entre 500 y 800 años antes de nuestra era. Estos hallazgos corresponden a las pruebas más antiguas, hasta ahora encontradas, del consumo psicotrópico del cannabis. Por otro lado, aunque algunos autores han documentado la inclusión del cannabis en remedios herbales contra la artritis encontrados en tratados médicos chinos con más de 5 000 años de antigüedad, las evidencias arqueológicas más antiguas de su uso medicinal provienen de entierros de casi 400 años antes de nuestra era, localizados en una zona cercana a Jerusalén.

La facilidad con la que las plantas silvestres de cannabis se adaptaron a los nuevos ambientes a los que llegaban durante las travesías humanas prehistóricas les permitió ser de las primeras en domesticarse. Aunque durante aproximadamente 6 000 años sus usos principales fueron como alimento y fibra, el desarrollo de las técnicas de cultivo y labranza permitió que nuevas plantas se incorporaran al acervo agrícola disponible. Sin duda, pudieron surgir mejores opciones que el cannabis para satisfacer las necesidades de alimento y cobijo, pero gracias a sus nuevas propiedades, pudo mantenerse con el estatus de planta mágica. El éxito alcanzado como planta mágica puede apreciarse considerando las miles de variedades que hoy existen y que difieren, precisamente, en su composición química.

Los usos recreacionales de las drogas han sido motivo de debate y polémica por muchos años y seguramente lo seguirán siendo por muchos más.

Algunos grupos sociales pugnan por su legalización argumentando que su consumo es un tema de libertades individuales y que, por lo tanto, debe quedar sujeto a la responsabilidad de los propios usuarios. Otros sectores señalan que una estricta regulación es necesaria, dados los efectos que causan sobre la salud física y mental. En todo caso, la información precisa es la mejor herramienta para conducir este debate. Sin embargo, e independientemente de la postura que se asuma al respecto, la historia de la relación de esta planta con los humanos ilustra cómo pueden surgir diferentes aplicaciones para un mismo recurso, y llegar a cambiar radicalmente los propósitos iniciales de su cultivo.

Los autores reciben financiamiento de la Secihti (CBF2023-2024-1879). Se agradecen los comentarios de la doctora María de Lourdes Miranda-Ham para la elaboración de este artículo y la asistencia de la arquitecta Sofía Vázquez-Miranda en la edición de las figuras.

Felipe Vázquez-Flota

Unidad de Biología Integrativa, Centro de Investigación Científica de Yucatán.

felipe@cicy.mx

José Armando Muñoz-Sánchez

Unidad de Biología Integrativa, Centro de Investigación Científica de Yucatán.

arms@cicy.mx

Lecturas recomendadas

- Gould, J. (2015), "The cannabis crop", *Nature*, 525:S2-S3.
- Manzanilla Rivas, R. A. y V. Limones Briones (2019), "Cannabis sativa L. y su potencial farmacéutico", *Desde el Herbario CICY*, 11:167-171.
- Pain, S. (2015), "A potted history", *Nature*, 525:S10-S11.
- Ramírez Morillo, I. M. (2016), "¿Qué tienen en común la marihuana y la cerveza?", *Desde el Herbario CICY*, 8:20-23.
- Vázquez Flota, F. (2021), "Una breve historia del cannabis en tres partes", *Desde el Herbario CICY*, 13:189-194.

José Eduardo González Reyes

Desde las redes

¿Un secreto oculto en el cromosoma X?

Se ha observado alrededor del mundo que las mujeres viven más que los hombres, independientemente de su nivel socioeconómico e incluso durante hambrunas y epidemias. Además, suelen ser más resistentes al deterioro cognitivo a medida que envejecen. Esto sugiere la posibilidad de que exista una relación entre longevidad y genes.

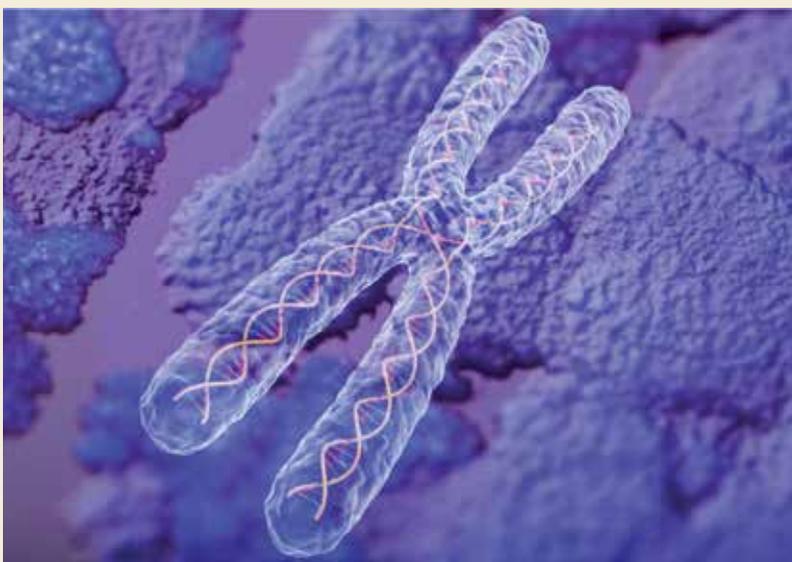
En las primeras etapas de desarrollo de las personas que portan dos copias del cromosoma X, una de éstas se recubre y se inactiva. Algunos estudios señalan que aún con esto, en promedio, el 30% de los genes de este cromosoma silenciado aún puede expresarse.

¿Existe una relación entre estos dos hechos?

Un grupo de estudio se dio a la tarea de buscar una posible relación entre los genes de este cromoso-

ma y la longevidad. El equipo produjo crías de ratón portadoras de cromosomas XX en las que pudieron monitorear cuál de los genes estaba activo en al menos nueve tipos de células. Notaron que el envejecimiento activa la expresión de genes del cromosoma inactivo en las células del giro dentado del hipocampo, una zona del cerebro relacionada con la memoria y el aprendizaje. En particular, notaron un aumento de la expresión de PLP 1, un gen asociado con la producción de mielina, un material rico en lípidos que rodea los axones de las neuronas para aislarlos y aumentar la velocidad a la que los impulsos eléctricos pasan a lo largo de éstas. Los autores también aumentaron, por medio de terapia génica, la expresión de este gen en ratones más viejos de ambos sexos, lo que se tradujo en mejores resultados en una prueba de navegación en un laberinto con respecto a aquellos que no tenían este ajuste.

Aunque aún quedan muchas preguntas sobre cómo la regulación de los genes del cromosoma inactivo impacta en la longevidad y la protección contra el deterioro cognitivo, este estudio abre la puerta a buscar el funcionamiento de los genes sexuales desde una nueva perspectiva.



El 30% de los genes del cromosoma X silenciado en individuos XX aún puede expresarse. Crédito: Freepik.

Más información

M. Gadek *et al.* (2025), "Aging activates escape of the silent X chromosome in the female mouse hippocampus", *Sciences Advances*, 11(10). Disponible en: <doi.org/10.1126/sciadv.ads8169>, consultado el 12 de marzo de 2025.

La IA tras los errores en los *papers*

Cometer errores es una de las cosas más comunes, pero cometer errores en un artículo científico y que sea publicado puede tener consecuencias graves en diversos grados.

El año pasado se viralizó la noticia, basada en un artículo de investigación, que señalaba que los utensilios de cocina de plástico negro podrían contener niveles altos de retardantes de llama, sustancias que previenen que un objeto se inflame, pero que se encuentran relacionadas con el cáncer. Sin embargo, la cantidad estimada en la investigación estaba mal calculada debido a un error matemático.

Partiendo de la premisa de que este tipo de errores podrían ser fácilmente detectados por una inteligencia artificial (IA), este incidente dio pie a la iniciativa Black Spatula Project, en la que algunos desarrolladores de *software* y cientos de voluntarios utilizan la IA para detectar inconsistencias en investigaciones publicadas.

Aunque su proyecto ha detectado cientos de errores, por ahora no los han hecho públicos y se han dedicado a contactar de manera personal a los autores de los estudios afectados.

Otro proyecto que realiza una tarea similar es YesNoError, que bajo el lema “Protegiendo a la humanidad a través de la integridad científica”, ha analizado decenas de miles de artículos y detectado cientos de errores en la literatura científica. Sus costos son menores a medio dólar por cada análisis que realiza. Las verificaciones se realizan en al menos cinco rubros: metodología, análisis matemático, interpretación de resultados, discrepancias y escritura.

En ambos casos los creadores buscan que los autores usen estas herramientas como una especie de autoauditoria previa a la publicación de sus artículos, lo que evitaría que los errores lleguen a la lite-

ratura, pues, aunque es posible hacer correcciones o retracciones, el impacto puede ser menor que el que se tendría al publicar por primera vez.

Una preocupación de la comunidad científica sobre el uso de estas herramientas son los falsos positivos, es decir, fallos que tenga la IA al señalar errores en artículos en los que no los hay. Por ejemplo, Black Spatula Project calcula una tasa de 10% de falsos positivos. Esto puede ser problemático pues podría generar crisis de reputación para las personas señaladas con errores en sus trabajos académicos.

Más información

E. Gibney (2025), “AI tools are spotting errors in research papers: inside a growing movement”, *Nature*. Disponible en: <doi.org/10.1038/d41586-025-00648-5>, consultado el 12 de marzo de 2025.



Algunos errores cometidos en publicaciones científicas pueden ser rastreados por medio de programas de inteligencia artificial. Crédito: Freepik.

¡No lo cites! Penalización de conductas inapropiadas en la academia

En los últimos años las denuncias por acoso sexual han aumentado en diversas esferas sociales y el mundo académico no se encuentra exento de ellas. Un grupo de científicos se dio a la tarea de saber si los investigadores con este tipo de denuncias ven reducidas las citas de su trabajo.

Para ello dieron seguimiento a las citaciones de 15 investigadores durante los tres años posteriores a que fueron acusados públicamente de conductas sexuales inapropiadas. También monitorearon las de 15 investigadores acusados de conductas académicas fraudulentas, como fabricación de datos, falsificación y plagio. Además, agregaron al conjunto de datos las citas de 142 investigadores que no habían recibido ningún tipo de acusación.

Los resultados fueron sorprendentes y contrarios a lo que esperaban encontrar.

Las citas de las personas que habían sido acusadas de ser presuntos acosadores sexuales disminuyeron tras hacerse pública la acusación, pero no sucedió

lo mismo con aquellos que fueron acusados de tener malas conductas académicas.

El grupo de investigación esperaba que la reducción de citas fuera realmente significativa en el caso de los académicos acusados de conducta científica inapropiada, puesto que, aunque ser señalado de acoso sexual es una situación grave, no interfiere en la calidad de la producción académica.

La investigación también incluyó encuestas con personas académicas, masculinas y femeninas, para conocer las causas que les orillan a citar o no un trabajo. El 85 % afirmó que, si tuvieran que elegir, preferirían citar el artículo de un acosador sexual antes que el de un estafador. Sin embargo, estos resultados no hacen eco con lo observado en el seguimiento de las citas.

Los autores postulan dos posibles explicaciones para esta contradicción. Por un lado, los científicos podrían estar sobreestimando su capacidad para evaluar el valor de un hallazgo científico con respecto de la responsabilidad moral de su autor. Por otro lado, el grupo postula que tal vez los investigadores son conscientes de que es menos probable que citen publicaciones escritas por académicos acusados de conducta sexual inapropiada, pero no estén dispuestos a admitirlo.

Este estudio, pionero en este sentido, podría ayudar a aumentar la conciencia de los académicos sobre la forma en que sus decisiones de citación podrían estar sesgadas.



Un informe de 2021 estima que, en Estados Unidos, alrededor del 20 % de las mujeres y el 7 % de los hombres universitarios fueron víctimas de conducta sexual inapropiada durante sus años universitarios. Créditos: Freepik.

Más información

G. Maimone *et al.* (2025), "Citation penalties following sexual *versus* scientific misconduct allegations", *PLOS One*, 20(3): e0317736. Disponible en: <doi.org/10.1371/journal.pone.0317736>, consultado el 12 de marzo de 2025.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



La Academia Mexicana de Ciencias dio a conocer a las y los ganadores de los Premios Weizmann 2024

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) dio a conocer a las y los ganadores de los Premios Weizmann 2024. Las tesis doctorales de tres científicas y científicos mexicanos jóvenes fueron merecedoras del reconocimiento tras evaluar la originalidad, rigor académico e importancia científica de los trabajos de investigación.

La Asociación Mexicana de Amigos del Instituto Weizmann de Ciencias y la Academia otorgan, en conjunto, desde 1986, este reconocimiento a las mejores tesis doctorales realizadas en México por investigadores e investigadoras menores de 35 años, en el caso de hombres, y menores de 38 años, en el de las mujeres, en las áreas de ciencias exactas y ciencias naturales. A partir de 2001 también se otorga a las mejores tesis doctorales en ingeniería y tecnología.

Las ganadoras y ganadores de los Premios Weizmann 2024 son:

Ciencias exactas

- **Jessica Jesús Arcudia Muñoz**

Título de la tesis: *JAM: un lenguaje para materiales estructurados por capas*

Doctorado en Ciencias en Físicoquímica

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Mérida, Instituto Politécnico Nacional

Tutor: José Gabriel Merino Hernández

Ciencias naturales

- **Jessica Paola Bahena López**

Título de la tesis: *Modulación del cotransportador de NaCl (NCC) por glucosa y fructosa vía CaSR-WNK4-SPAK: Implicaciones en la hipertensión asociada a trastornos metabólicos como la diabetes tipo 2 y el consumo elevado de fructosa*

Programa de Estudios Combinados en Medicina (PECEM),

Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México

Tutor: Gerardo Gamba Ayala

Ingeniería y tecnología

- **Carlos Fernando Ceballos González**
Título de la tesis: *Bioprinting of spatially organized cancer models using chaotic flows*
Doctorado en Biotecnología
Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
Tutor: Mario Moisés Álvarez

Ganadores de los Premios de la Academia para las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades de 2024

La AMC dio a conocer los nombres de las y los ganadores de los Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades de 2024, los cuales se otorgan desde 1996 a investigadores e investigadoras que no hayan cumplido 38 años, en el caso de los hombres, y 40 años en el de las mujeres, y cuyas tesis se hayan realizado en el país, en alguna institución acreditada.

La convocatoria anual de este premio se lleva a cabo en conjunto con nueve instituciones representativas de las ciencias sociales y las humanidades en México: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma Metropolitana, El Colegio de México, la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, el Centro de Investigación y Docencia Económicas, el Instituto José María Luis Mora, el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN y el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

La ganadora y los ganadores de 2024 son:

Ciencias sociales

- **Ana Patricia Valencia Ávila**
Título de la tesis: *Corazón de maguey (1930-2024): la memoria biocultural del maguey en una comunidad de la Altiplanicie pulquera de Hidalgo*
Posgrado en Antropología Social
Escuela Nacional de Antropología e Historia, Instituto Nacional de Antropología e Historia
Tutora: María de la Paloma Escalante Gonzalbo
- **Jonathan Jesús López Rodríguez**
Título de la tesis: *Más allá del Congreso: Causas de las variaciones en el trabajo territorial de los diputados federales en México. El caso de la LXIV Legislatura (2018-2021)*

Doctorado en Ciencias Políticas y Sociales
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México
Tutor: Khemvirg Puente Martínez

Humanidades

- **Alberto Colín Huizar**
Título de la tesis: *Narrativas docentes frente a la violencia criminal en entornos de escuelas públicas del Valle de Apatzingán, Michoacán, México*
Doctorado en Ciencias Sociales
Instituto de Investigaciones Histórico-Sociales, Universidad Veracruzana
Tutor: José Alfredo Zavaleta Betancourt
- **Víctor Maximino Martínez Ocampo**
Título de la tesis: *Una metrópoli hambrienta: abasto, escasez y estrategias de subsistencia en la ciudad de México durante la Revolución (1913-1917)*
Programa de Doctorado en Historia
Facultad de Filosofía y Letras, UNAM
Tutora: María Dolores Lorenzo Ríos

CITA (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia)

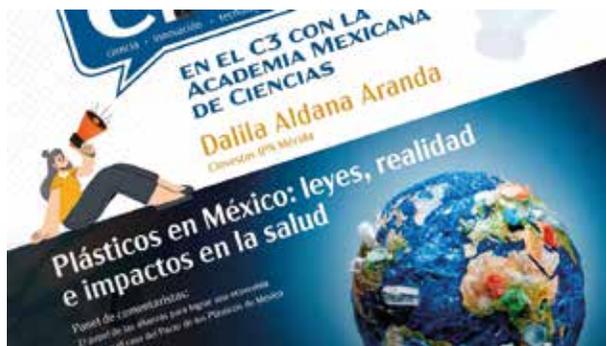
La AMC y el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM coordinan CITA (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia), espacio mensual en el que se reúnen miembros de distintas comunidades de la ciencia, la tecnología, la innovación, la comunicación de la ciencia y el público no especializado para intercambiar perspectivas sobre temas científicos y tecnológicos relevantes y coyunturales.

Los encuentros del programa de CITA son coordinados por Julia Tagüeña Parga, Coordinadora de Comunicación del C3, investigadora emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro de la AMC. El formato es presencial y también se transmite por los canales de YouTube de la AMC y del C3.

Las conferencias más recientes son:

- **26 de noviembre de 2024**
"La salud desde un enfoque complejo"
Ana Leonor Rivera
Instituto de Ciencias Nucleares y Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM
<https://www.youtube.com/live/pDMeUwBZ4k8>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron María Ester Brandan del Instituto de Física de la UNAM; Ruben Fossion del Instituto de Ciencias Nucleares y el C3, UNAM, así como Osbaldo Resendis de la Red de Apoyo a la Investigación, del C3-UNAM y del Inmegem; con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.



- **25 de febrero de 2025**
 “Plásticos en México: leyes, realidad e impactos en la salud”
 Dalila Aldana Aranda
 Cinvestav-IPN, Mérida
<https://www.youtube.com/live/rp4omGXHWs0>
 Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Aline Nolasco del World Wildlife Fund de México, María Laura Rojas del CRDC México, y José Ernesto Carmona Gómez de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM; con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.

Hipótesis, un podcast de la Academia Mexicana de Ciencias

En este podcast, la Academia Mexicana de Ciencias impulsa contenidos de actualidad en áreas de ciencias, tecnologías y humanidades por medio de historias basadas en evidencia. La conducción, producción e investigación se encuentran a cargo de Eduardo González. Se puede acceder a los capítulos del podcast en dos plataformas y la distribución está a cargo de Eduardo González y Walter Galván.

YouTube:

<https://www.youtube.com/@AMCciencias/podcasts>

Spotify:

<https://open.spotify.com/show/2nvLdKChWvPouNmAwZm3fP>

El capítulo más reciente es:

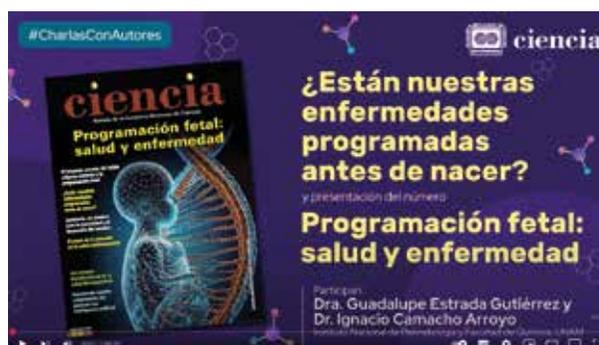


- **“¿Por qué no hay más científicas?”**
 En este primer capítulo analizamos algunas de las dificultades que enfrentan las mujeres desde la infancia para estudiar carreras relacionadas con ciencia, tecnología, ingenierías y matemáticas. Participan las doctoras Julia Tagüeña y Aliesha González.
<https://open.spotify.com/episode/1scA1ezBy1qrpJdSi6l0pZ>

Charlas con autores de la revista *Ciencia de la AMC*

Continúan las pláticas que diversos autores, que han contribuido en diferentes números de la revista *Ciencia de la AMC*, dictan a través de las redes sociales de la revista. Las charlas más recientes han sido:

- **28 de enero de 2025**
 Presentación del número dedicado a “Programación fetal, salud y enfermedad”
 Guadalupe Estrada Gutiérrez e Ignacio Camacho Arroyo
 Instituto Nacional de Perinatología y Facultad de Química,
 UNAM
<https://www.youtube.com/live/PaJhXOI-E2A>



- **4 de febrero de 2025**
 “El papel de la placenta en la salud cardiovascular”
 Salvador Espino y Sosa
 Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/6pQtZn-cZ4E>

- **11 de febrero de 2025**
 “Impulsando nuestra comprensión del universo con inteligencia artificial”
 Elizabeth Martínez Gómez
 Tec de Monterrey, campus Cuernavaca
<https://www.youtube.com/live/JehZwp82o18>



- **17 de febrero de 2025**
 “El lenguaje secreto del tejido adiposo materno y la programación fetal”
 Miranda Molerés Orduña y Juan Mario Solís Paredes
 Instituto Nacional de Perinatología
https://www.youtube.com/live/vwJ01aZuq_0

- **25 de febrero de 2025**
 “Lactancia, un sendero para la inmunidad y el desarrollo del cerebro”
 Ismael Mancilla Herrera y Gabriela González Pérez
 Instituto Nacional de Perinatología
https://www.youtube.com/live/SNs_Dn0r-xc



- **27 de febrero de 2025**
 Ovarios poliquísticos: una batalla hormonal desde la vida intrauterina
 Enrique Reyes Muñoz, Lidia Arce Sánchez y Nayeli Martínez Cruz
 Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/c-r4J3F4AZO>



- **4 de marzo de 2025**
 “La salud mental perinatal y el desarrollo del cerebro infantil”
 Arturo Alejandro Canul Euan, de Star Médica, Hospital Infantil Privado
 Sandra Martínez Medina y Blanca Vianey Suárez Rico, del Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/-4B6LioAiWE>

- **6 de marzo de 2025**
 “Las vitaminas y minerales durante el embarazo: beneficios para una nueva vida”
 Otilia Perichart Perera
 Instituto Nacional de Perinatología
<https://www.youtube.com/live/vc9eiq2jbQ4>

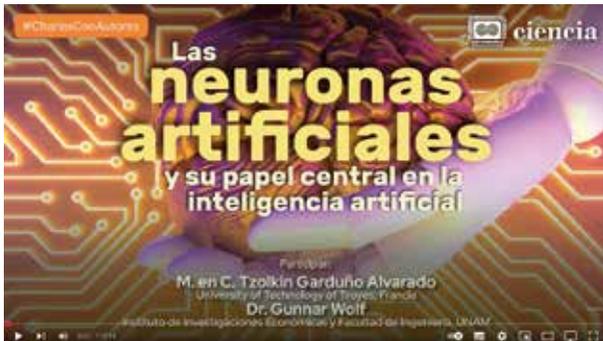


- **11 de marzo de 2025**
 “Las neuronas artificiales y su papel central en la inteligencia artificial”

Tzolkin Garduño Alvarado, de University of Technology of Troyes, Francia

Gunnar Wolf, Instituto de Investigaciones Económicas y Facultad de Ingeniería, UNAM

<https://www.youtube.com/live/4D9INXPfHx4>



6. Webinar “Tu mundo con ciencia”

Continúa el ciclo de conferencias “Tu mundo con ciencia”, impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L’Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y son transmitidas por los canales de las redes sociales de la AMC. Las conferencias están orientadas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar vocaciones científicas. En el mes de agosto de 2024 inició su cuarta temporada. Las conferencias más recientes son:

- 9 de enero de 2025
 “Pequeñas partículas, grandes esperanzas: avances en el tratamiento del cáncer”
 Monserrat Llaguno Munive
 Instituto Nacional de Cancerología
<https://www.youtube.com/live/pLhHckNhx-Y>



- 13 de febrero de 2025
 “Cazadora de parásitos: en busca de amibas y trichomonas”

Rossana Arroyo Verástegui

Cinvestav

<https://www.youtube.com/watch?v=BkXRzNw9JaQ>



- 13 de marzo de 2025
 “Los detergentes como contaminantes emergentes: ¿siendo limpios ensuciamos?”
 Karla Ximena Vargas Berrones
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí
<https://www.youtube.com/live/d9JVJ7k1qC0?si=6Ba7G-1SIBS7qfXhc>



Inauguración de la exposición “Las Marianas de la Mar”

En el marco del pasado Día Internacional de la Niña y la Mujer en la Ciencia, celebrado cada 11 de febrero, se inauguró la exposición “Las Marianas de la Mar” en la Alianza Francesa de Mérida.

La exposición busca resaltar el trabajo de 11 científicas francesas y mexicanas que trabajan en temáticas relacionadas con la biología marina y la oceanografía por medio de pósters y videos.

La muestra, que será itinerante, se realiza en el marco de la Reunión Mundial Sobre los Océanos, que se llevará a cabo en la ciudad de Niza, Francia, este 2025. Esto, como parte del

programa 2030 de la Organización Mundial de las Naciones Unidas.

Esta exposición se realizó como una colaboración entre la Academia Mexicana de Ciencias, el Cinvestav y la Alianza Francesa de Mérida en Yucatán, bajo el liderazgo de la doctora Dalila Aldana Aranda, presidenta de la sección Sur-Sureste de la AMC.

La inauguración contó con la presencia de la Embajadora de México en Francia, Blanca Jiménez Cisneros, y la Embajadora de Francia en México, Delphine Borione, en compañía de autoridades federales y estatales.

Participó también el presidente de la AMC, José Seade Kuri; el director del Cinvestav, Alberto Sánchez Hernández; el rector de la Universidad Autónoma de Yucatán, Carlos Estrada Pinto; la presidenta de la Asociación *Mariannes de Mexico*, Cintia Angulo; la titular de la Secretaría de Pesca y Acuacultura Sostenibles del Estado de Yucatán, Lila Frías, y la secretaria de Ciencia, Investigación, Humanidades, Tecnología e Innovación de Yucatán, Geovani Cecilia Campos Vázquez, entre otros.

Las científicas reconocidas en la exposición son:

- Anne-Marie Alayse-Danet (Francia)
- Elva Escobar Briones (México)
- Mireille Harmelin-Vivien (Francia)
- Hélène de Pontual (Francia)
- María del Carmen García Rivas (México)
- Catherine Jeandel (Francia)
- Yolande Bouchon (Francia)
- Rosa Isabel Ochoa Báez (México)
- Sylvie Gustave Dit Duflo (Francia)
- Claire Hellio (Francia)
- Dalila Aldana Aranda (México)



En nuestro próximo número
de julio-septiembre de 2025

NOVEDADES CIENTÍFICAS



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

