

Año 4, Número 6, enero-abril 2026. Publicada el 6 de abril de 2026

# LA RENOVABLE

**Hackeando al Sol:**  
¿pueden la IA y Python  
crear la celda solar perfecta?

**Minerales críticos:** el eslabón geológico que  
sostiene la transición energética

**La liga de las superheroínas invisibles:**  
cómo la ciencia usa bacterias y microalgas  
para limpiar el planeta

**Sergio Cuevas:** los fluidos, su mecánica y una  
mirada al comportamiento de la materia

# Funcionalidades interactivas

Pensando en tu comodidad, hemos diseñado esta revista digital con diversas funcionalidades interactivas que transformarán tu experiencia de lectura en algo dinámico, fluido y fácil de explorar.

La tabla de contenido te permite desplazarte de manera ágil entre los temas. Solo haz clic o toca los títulos o números de página para ir directamente al contenido.

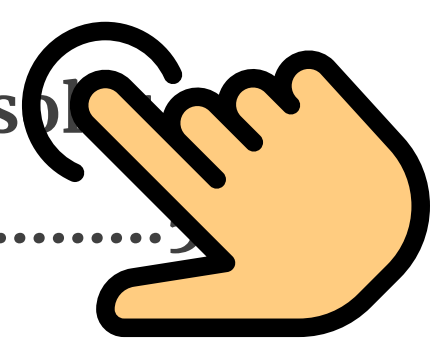
Las imágenes superiores también funcionan como accesos rápidos a los temas más relevantes. Un solo toque y estarás allí.



## Contenido

### Tendencias actuales

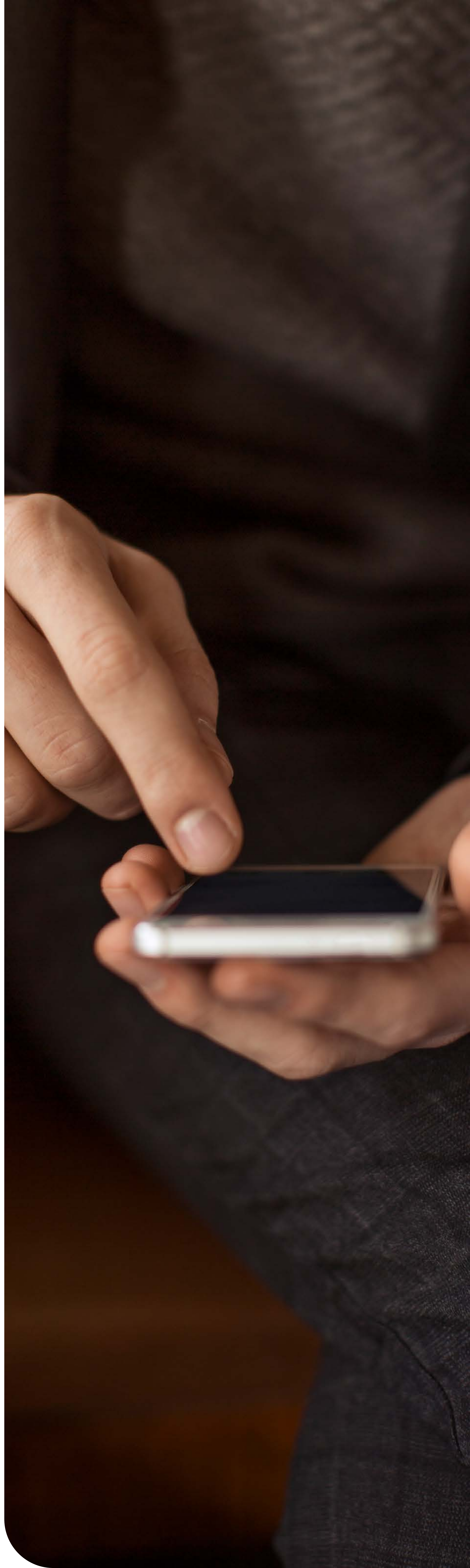
- Hackeando al Sol: ¿pueden la IA y Python crear la celda solar perfecta? ..... 9  
*Moisés Jared Suárez Román*
- Soplando sobre las olas: el potencial de la energía eólica marina en el Golfo de México ..... 9  
*Diego Arturo Canul Reyes*



Y para que nunca te pierdas, hemos incorporado un botón en la esquina inferior derecha que te llevará de vuelta a la tabla de contenidos desde cualquier página.



Esperamos que disfrutes de esta publicación que con mucha dedicación hemos creado para ti.



## Directorio

### UNAM

**Dr. Leonardo Lomelí Vanegas**  
Rector

**Dra. Patricia Dolores Dávila Aranda**  
Secretaria General

**Mtro. Tomás Humberto Rubio Pérez**  
Secretario Administrativo

**Dra. Diana Tamara Martínez Ruiz**  
Secretaria de Desarrollo Institucional

**Dra. María Soledad Funes Argüello**  
Coordinadora de la Investigación Científica

**Instituto de Energías Renovables**  
**Dr. Miguel Robles Pérez**  
Director

**Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández**  
Secretario Académico

**Lic. Celeste Morales Santiago**  
Secretaria de Gestión Tecnológica y Vinculación

**Lic. Daniela P. Juárez Bahena**  
Jefa de la Unidad de Comunicación de la Ciencia

**La Renovable**  
**Mtra. Nicté Yasmín Luna Medina**  
Editora

**Mtro. C. David Leal Fulgencio**  
Asistente editorial

**Lic. Daniela P. Juárez Bahena**  
Encargada de promoción y difusión

**Mtra. M. Carolina Aguayo Miranda**  
Encargada del marketing digital

**EsBrillante**  
Diseño gráfico

**Contraportada**  
Mtra. M. Carolina Aguayo Miranda

**Consejo Editorial**  
Dr. Mariano López de Haro  
Fis. Juan Tonda Mazón  
Dra. Marina Elizabeth Rincón González  
Dr. Sergio Cuevas García  
Dr. Eduardo Ramos Mora  
Dr. Jesús Antonio del Río Portilla  
Dra. Dulce María Arias Lizárraga  
Mtra. Luisa González Arribas  
Dra. Gabriela Frías Villegas  
Dra. Julia Tagüeña Parga

**Personas revisoras invitadas**  
Dr. Ugochukwu Patrick Okoye  
Mtra. Ana Laura Sarracino Ortiz  
Dr. Emmanuel Hernández Mayoral  
Dr. Rafael Campos Amezcua

**Corrección de estilo**  
Mtro. C. David Leal Fulgencio  
Mtra. Nicté Yasmín Luna Medina  
Lic. Daniela P. Juárez Bahena

La Renovable, Año 4, No. 6, enero-abril 2026 es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 045510, Ciudad de México, a través del Instituto de Energías Renovables. Domicilio: Privada Xochicalco S/N Temixco, Morelos, México C.P. 62580. Teléfonos: (52) 777 362 0090 (ext. 29744) y (52) 555 622 9744. <https://www.ier.unam.mx/LaRenovable.html>, [larenovable@unam.mx](mailto:larenovable@unam.mx).

La Renovable © 2026 del Instituto de Energías Renovables de la UNAM tiene licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Editora responsable: Nicté Yasmín Luna Medina. Certificado de Reserva de Derechos al uso Exclusivo No. 04-2023-012010580600-102. ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Instituto de Energías Renovables, Privada Xochicalco S/N Temixco, Morelos, México C.P. 62580, fecha de la última modificación, 27 de marzo.

El contenido de los artículos es responsabilidad de las personas autoras y no refleja el punto de vista del Consejo Editorial o de la UNAM. Se prohíbe la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados por cualquier medio sin la autorización expresa de las personas editoras.

# Contenido

## Tendencias actuales

- **Hackeando al Sol: ¿pueden la IA y Python crear la celda solar perfecta?** .....5  
*Moisés Jared Suárez Román*
- **Soplando sobre las olas: el potencial de la energía eólica marina en el Golfo de México** ..... 9  
*Diego Arturo Canul Reyes*

## Energía y sociedad

- **Minerales críticos: el eslabón geológico que sostiene la transición energética** ..... 12  
*David Yáñez-Dávila y Antoni Camprubí*

## Ventana a las energías renovables

- **El mundo de lo pequeño al alcance de un vistazo: las maravillas de la microscopía electrónica aplicadas al análisis de películas de CdS**..... 17  
*Irving Galindo Márquez, Melvia Carinne Mejía Vázquez, Imelda Antonia Pedraza Chan, Eliseo Rincón Suárez, y Anayantzi Luna Zempoalteca*
- **Secado en modo inteligente: del sol a la receta en código** ..... 21  
*Nicolás Iván Román Roldán, Alfonso Monzamodeth Román Sedano y Anabel López Ortiz*
- **La liga de las superheroínas invisibles: cómo la ciencia usa bacterias y microalgas para limpiar el planeta** ..... 25  
*María del Socorro Ramos Ocampo*

## Entrevista con

- **Sergio Cuevas: los fluidos, su mecánica y una mirada al comportamiento de la materia**.....32  
*Juan Manuel Valero*

## Renueva tus conocimientos

- **El derecho a ser científicas** ..... 34  
*Daniela Cervantes Sedano*



## Carta editorial


A quienes siguen La Renovable:

La inteligencia artificial (IA) se ha vuelto una herramienta cotidiana en el ámbito académico. El área de las energías renovables no ha sido la excepción: la investigación la utiliza para analizar grandes volúmenes de datos, optimizar procesos y acelerar el desarrollo tecnológico con el fin de hacer frente a los desafíos del cambio climático y la transición energética.

En este número te contamos cómo la inteligencia artificial se ha incorporado en el análisis de datos experimentales para el desarrollo de celdas solares, así como en la optimización de secadores solares mediante modelos de aprendizaje automático.

Sin embargo, la transición energética no depende únicamente de algoritmos. También se requiere

continuar con los estudios para aprovechar las fuentes de energía renovables, como comprender el viento que podría impulsar turbinas en el Golfo de México, observar los materiales a escalas nanométricas o reflexionar sobre los materiales críticos que son indispensables para el desarrollo de las tecnologías limpias.

La transición energética es un complejo poliedro que requiere la suma de distintas estrategias para garantizar que todas las personas tengamos energía limpia, accesible y segura. En este número encontrarás algunas de esas caras que hoy se exploran para transformar nuestro futuro energético. 

**Nicté Luna**  
Editora

# Hackeando al Sol: ¿pueden la IA y Python crear la celda solar perfecta?

*Moisés Jared Suárez Román*

**Autoría situada:** Moisés Jared Suárez Román es estudiante de maestría en el IER-UNAM y dedica su investigación a la innovación en tecnología fotovoltaica de tercera generación. Su trabajo es impulsado por la pasión por las energías renovables y el firme objetivo de hacer la energía solar accesible para la sociedad.

## Las crónicas de un estudiante (y su café)

Es un día más en el posgrado del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM). Termina el primer semestre de la maestría de la UNAM y el ambiente es una mezcla extraña de cansancio y emoción. Miro a mis compañeros: están claramente impulsados por altos niveles de cafeína y, aun así, se ven agotados, como si en cualquier momento fueran a desfallecer sobre sus escritorios. Pero basta con saludarlos para que aparezca una sonrisa.

«Me siento un poco mejor, al menos no soy el único que sufre», pienso. «¿Esto es la maestría? ¡Me encanta!».

En solo un semestre aprendí más de lo que imaginaba. Física, matemáticas y conceptos que alguna vez cuestioné en la preparatoria —«¿y esto para qué me va a servir?»— empezaron a tener sentido real en el laboratorio. Sin embargo, al revisar mi correo institucio-

nal con la información sobre las materias del siguiente semestre, sentí un pequeño vacío: me había quedado con ganas de inscribirme a un curso de Python, un lenguaje de programación muy utilizado hoy en día.

Al principio me justifiqué pensando que debía enfocarme solo en energías renovables, que la programación podía esperar. Sonaba razonable..., hasta que me enfrenté a la realidad experimental. Para desarrollar nuevas tecnologías solares, no basta con entender la teoría: hay que analizar grandes cantidades de información, a una velocidad que mi cerebro humano —incluso con café— simplemente no podía alcanzar.

Necesitaba ayuda: un compañero que no se cansara, que no se equivocara por agotamiento y que pudiera procesar datos en segundos. La respuesta no estaba en el laboratorio, sino en mi computadora: la inteligencia artificial.

## La inteligencia artificial: ¿tabú o herramienta?

Hoy en día, la inteligencia artificial (IA) sigue generando opiniones encontradas, sobre todo en el ámbito académico. Muchas personas —me incluyo— hemos pensado que pedirle ayuda a una IA le quita mérito al trabajo, como si fuera una forma de hacer trampa.

A esto se suma otro temor común: que estas herramientas se equivoquen o incluso inventen información. Estas preocupaciones no son gratuitas. En sus inicios, la IA podía cometer errores graves, como generar datos falsos o referencias que no existían. Sin embargo, el contexto ha cambiado. Vivimos una verdadera revolución digital en la que estas herramientas han mejorado gracias a millones de pruebas, correcciones y usos reales por parte de personas de todo el mundo [1]. La IA puede entender instrucciones claras —llamadas *prompts*— y responder de forma mucho más precisa. En la investigación científica, esto ha abierto una nueva posibilidad: contar con una especie de asistente digital capaz de buscar información, resumir textos y ayudar a ordenar ideas en segundos.

Aun así, el debate continúa. Por un lado, hay quienes rechazan por completo la IA; por otro, quienes la usan sin pensar demasiado. Entre ambos extremos existe un punto medio mucho más interesante: usar la IA como una herramienta para trabajar mejor, no para dejar de pensar.

## Cuando los datos nos sobrepasan

Comencé a trabajar con este nuevo asistente digital con cierta cautela. Al principio, la IA me ayudaba a resumir artículos y a entender conceptos complejos. Pero el verdadero reto apareció al entrar de lleno al laboratorio, donde se desarrollan celdas solares de nueva generación, como las sensibilizadas por colorante y las de perovskita [2].

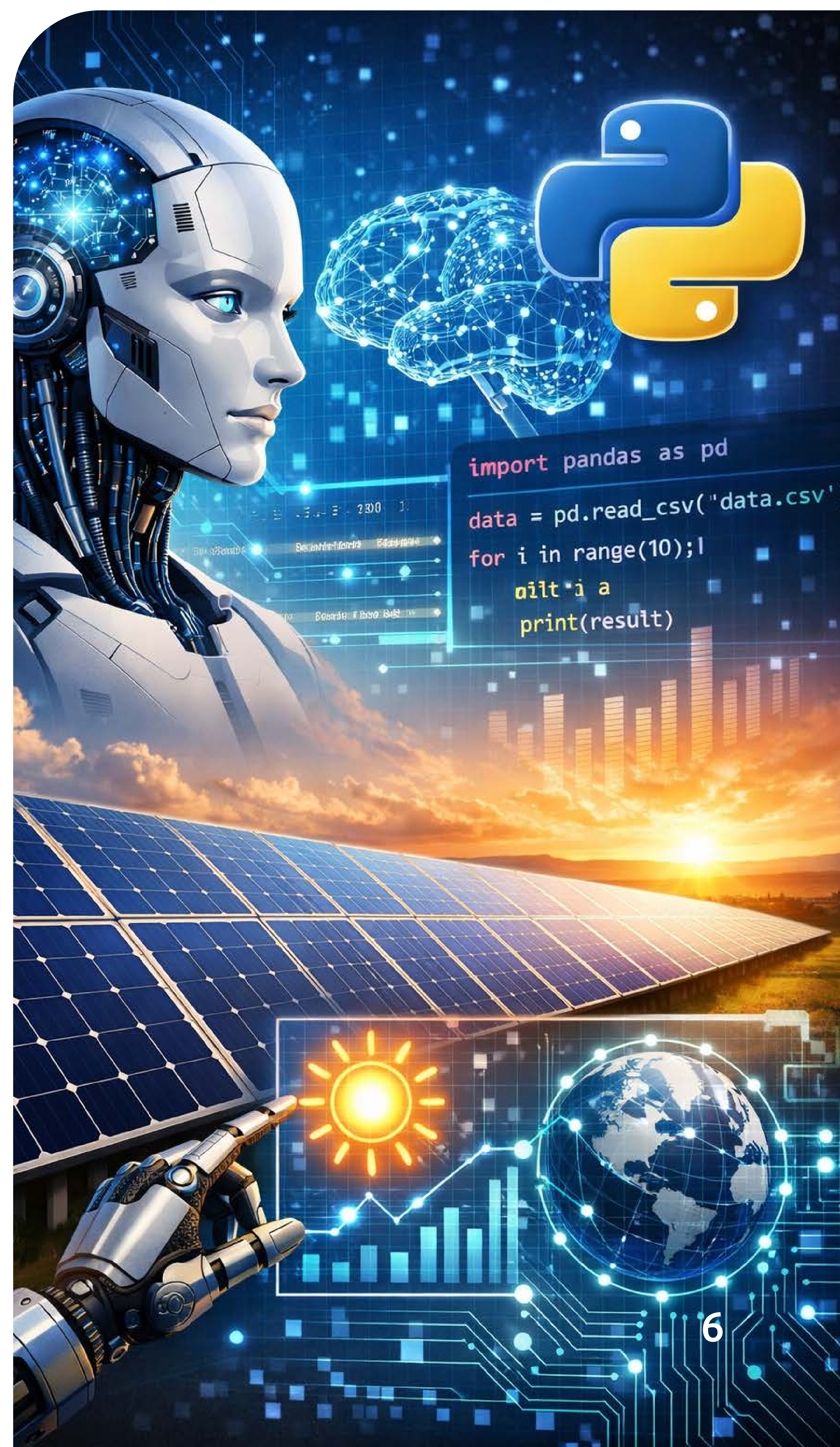
En este punto, las palabras bonitas dejan de ser útiles. En ciencia, lo que importa son los datos experimentales. Y esos datos llegan en grandes cantidades.

Imagina esta situación: realizas un experimento y obtienes más de cien gráficas distintas sobre el comportamiento de una celda solar. Cada una cuenta una parte de la historia y todas deben ser analizadas para entender qué ocurrió y por qué. Intenté organizar todo en hojas de cálculo tradicionales, y... digamos que mi computadora estuvo a punto de rendirse antes que yo.

¿Cómo encontrar patrones en un mar de números? En ese momento recordé el curso de programación que no había tomado. No necesitaba convertirme en experto en computación, pero sí aprender lo suficiente para que la computadora hiciera el trabajo repetitivo por mí. Así fue como, apoyado en cursos en línea y con la ayuda de la IA, comencé a aprender a programar [3]. El objetivo era claro: usar la tecnología para ahorrar tiempo, reducir errores y concentrarme en entender los resultados, no en copiar y pegar datos durante horas.

## Crea tus propias herramientas científicas

Una de las tareas más comunes en el estudio de celdas solares es analizar las llamadas curvas corriente-voltaje. Dicho de forma sencilla, estas gráficas nos indican qué tan bien funciona una celda solar y cuánta energía puede producir bajo ciertas condiciones.



nualmente, una por una, no solo es lento, también aumenta la probabilidad de cometer errores. Existen programas comerciales que realizan este análisis, pero muchos son costosos o poco flexibles para adaptarse a lo que realmente necesitamos en el laboratorio. Frente a esta situación, decidí intentar algo distinto.

Con ayuda de la programación en Python, conceptos básicos de análisis de datos y el apoyo de la IA para escribir y depurar código, comencé a desarrollar una solución hecha a la medida de mis necesidades.

El resultado fue una pequeña aplicación web. En lugar de pasar horas frente a hojas de cálculo, ahora basta con presionar un botón, cargar los datos experimentales y dejar que el programa genere automáticamente las gráficas. Estas quedan limpias y listas para su interpretación (Figura 1).

Pero la curiosidad científica rara vez se con-



Figura 1. Interfaz de la aplicación desarrollada para generar curvas de corriente-voltaje.

forma con un solo logro. Completar esta primera herramienta fue apenas el inicio. A partir de ella, inicié el desarrollo de otros programas con un objetivo común: hacer visible lo que normalmente no podemos ver.

Creé herramientas con diferentes fines: analizar cómo interactúa la luz con los materiales —por ejemplo, cuánta luz atraviesa una celda solar y cuánta se refleja—, estudiar la superficie y la rugosidad de los materiales y para comprender qué sucede dentro de la celda cuando la electricidad intenta circular. Incluso desarrollé un simulador didáctico que permite observar, de manera visual y en tiempo real, el movimiento de partículas cargadas dentro de una celda solar.



Figura 2. Módulo de análisis que genera automáticamente distintos tipos de gráficas eléctricas.

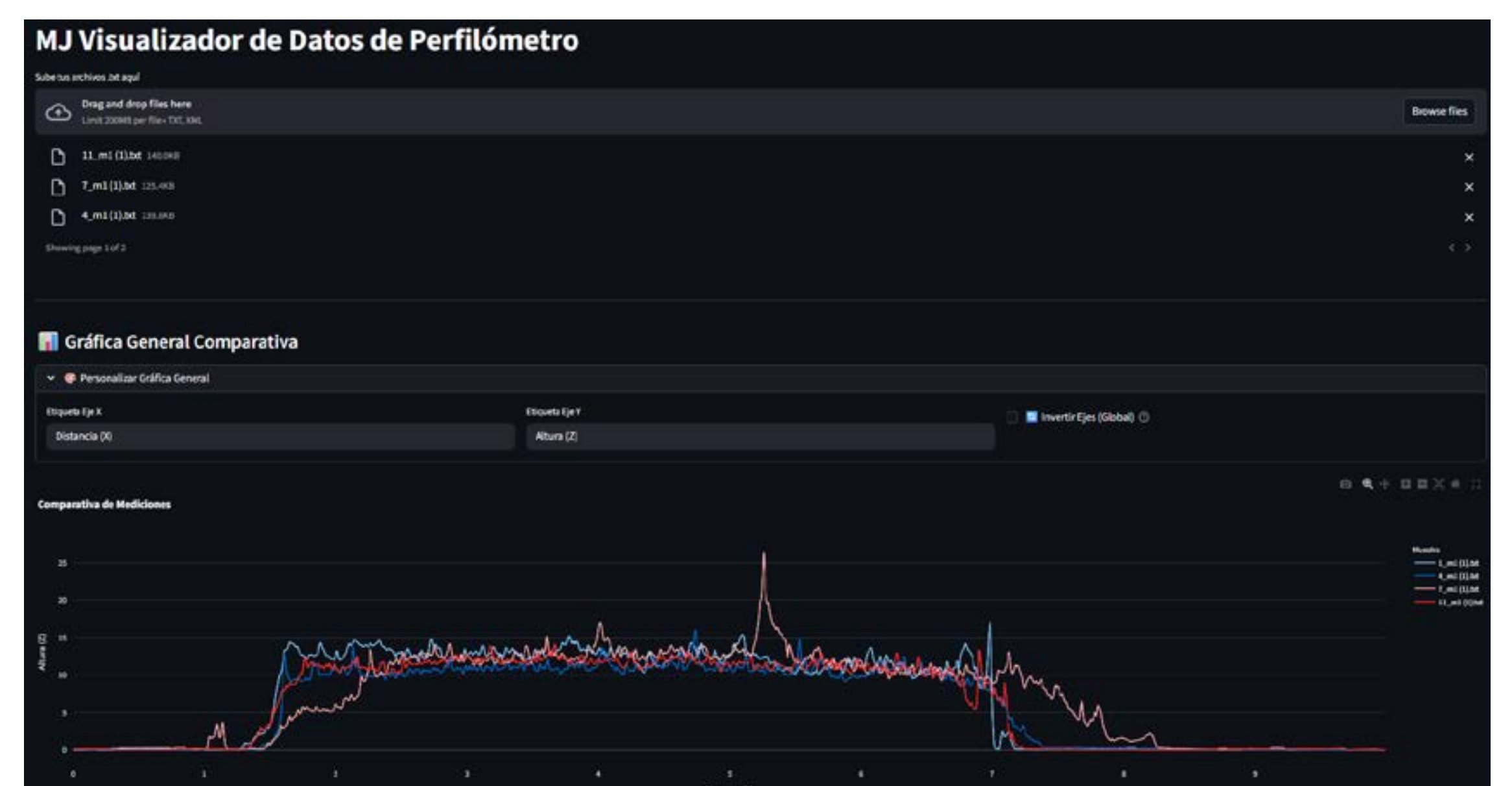


Figura 3. Herramienta para el estudio de la superficie de los materiales.



Figura 4. Visualización de datos ópticos relacionados con la interacción de la luz.

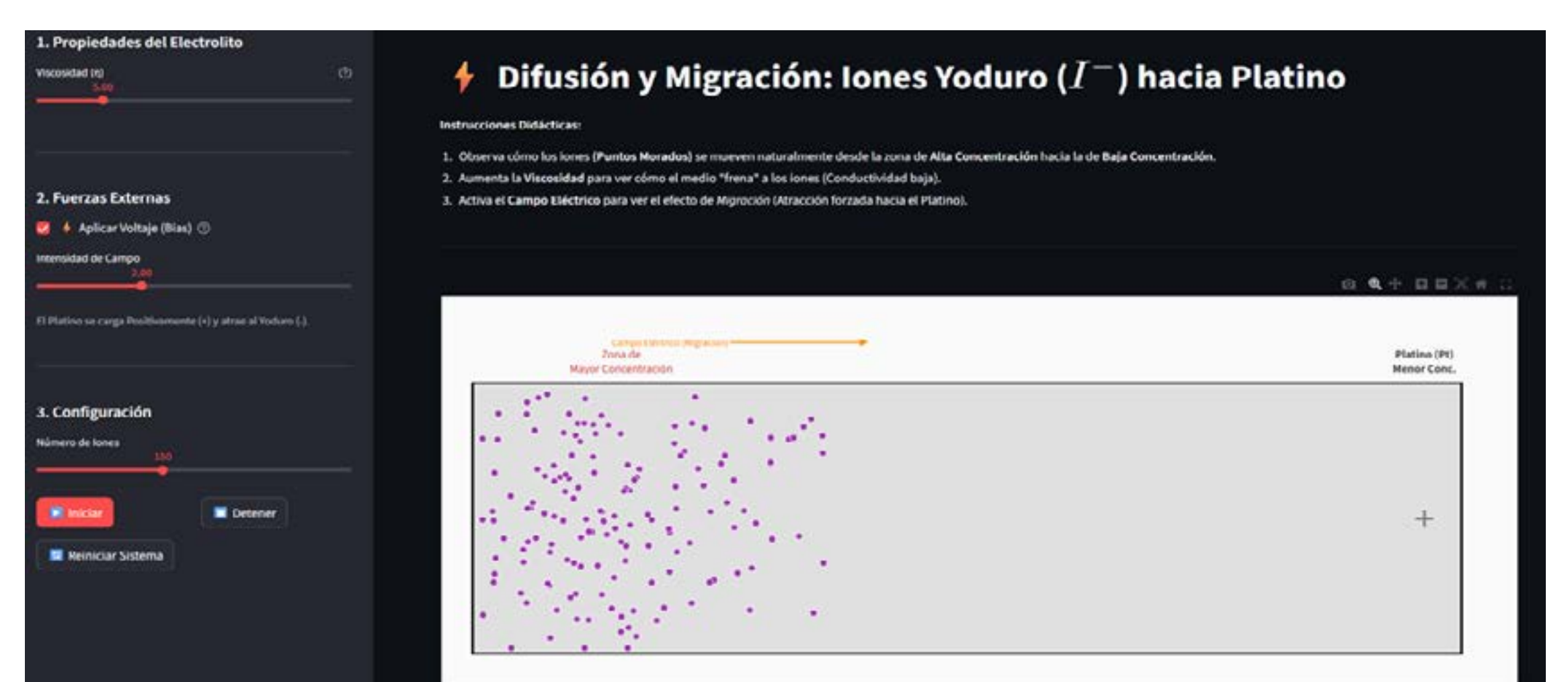


Figura 5. Simulador didáctico del movimiento de partículas dentro de una celda solar.

**Ante todo esto, surge una pregunta natural: ¿habría sido posible desarrollar estas herramientas sin aprender a programar, solo pidiéndoselo a la IA?**

**La respuesta es no. Y ahí está la clave del éxito.**

## Instrucciones para no fracasar (y no hacer trampa)

Si quieres usar la IA para mejorar tu trabajo —ya sea en una investigación, un proyecto escolar o una tarea— es importante tener algo claro desde el inicio: la IA no es magia. No basta con pedirle «hazme una app» o «resuélveme esto» y esperar un resultado confiable.

Para que estas herramientas realmente te ayuden, hay tres ideas básicas que conviene tener en mente.

**Primero: entender lo que estás usando.** No necesitas ser experto en programación, pero sí debes comprender, al menos de forma general, qué está haciendo la computadora. Si usas un resultado sin entenderlo, estás confiando a ciegas. En ciencia y en la escuela, eso es peligroso. La IA puede equivocarse o dar respuestas incorrectas con mucha seguridad, por lo que siempre es necesario revisar, comparar y comprobar la información.

**Segundo: saber explicarte.** La IA funciona mejor cuando recibe instrucciones claras. Usar los términos correctos y explicar bien el problema hace una gran diferencia. Es parecido a trabajar en equipo: mientras mejor te comuniqués, mejores serán los resultados.

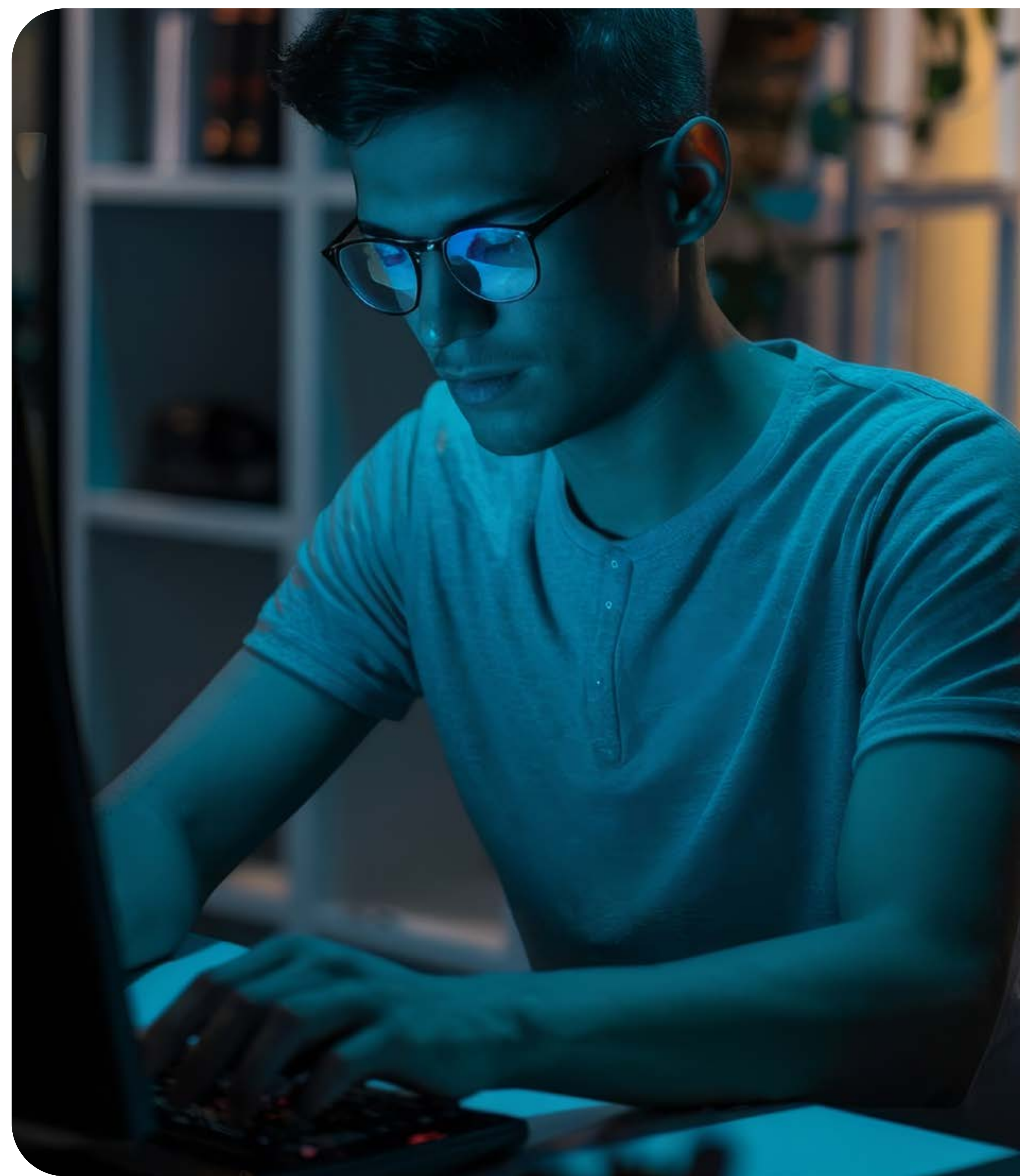
**Tercero: dar contexto.** La IA no lee la mente. Si no le explicas qué estás estudiando, para qué necesitas el resultado o en qué situación te encuentras, es fácil que se confunda. Dar contexto es como poner las reglas del juego antes de empezar.

Usada de esta manera, la IA deja de ser un atajo riesgoso y se convierte en una herramienta de aprendizaje.

## Una invitación a la eficiencia

La inteligencia artificial y la programación no vienen a reemplazar a estudiantes ni a científicos. Vienen a quitarnos el trabajo repetitivo y cansado para que podamos concentrarnos en lo verdaderamente importante: pensar, crear y resolver problemas.

Esta experiencia es una invitación a usar la tecnología con criterio, ética y curiosidad. En un mundo que enfrenta retos urgentes, como el cambio climático y la transición energética, aprovechar estas herramientas de forma responsable puede marcar la diferencia. Si no usamos la tecnología para mejorar el planeta, alguien más lo hará, y no necesariamente con el mismo objetivo. 🌱



## Referencias

- [1] Gemini Team, Google, «Gemini: A family of highly capable multimodal models», *arXiv preprint arXiv:2312.11805*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2312.11805
- [2] M. Grätzel, «Dye-sensitized solar cells», *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, no. 2, pp. 145-153, 2003. DOI: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1
- [3] W. McKinney, *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*, 3a ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2022.

# Soplando sobre las olas: el potencial de la energía eólica marina en el Golfo de México

Diego Arturo Canul Reyes

**Autoría situada:** Diego A. Canul Reyes es doctor en ingeniería e investigador en energía eólica. Su trabajo busca entender cómo y dónde aprovechar el viento para convertirlo en electricidad, desde el análisis de datos meteorológicos hasta el estudio del potencial de la energía eólica marina en México. Actualmente es profesor de asignatura en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche.

El viento siempre ha estado ahí, lo sentimos en el rostro al caminar por la playa, mueve las olas y refresca las tardes calurosas en la costa. Sin embargo, lo que para muchos es sólo una brisa cotidiana, para la ingeniería puede ser una fuente enorme de energía limpia. En el campo de la energía eólica, aprender a «leer» el viento es el primer paso para plantear una estrategia que nos ayude a aprovecharlo, ya sea en la tierra o en el océano. Aquí surge una

pregunta: ¿es posible aprovechar la energía del viento en el Golfo de México? <sup>[1]</sup>

Pero vamos por partes. Cuando queremos instalar una turbina eólica, es decir, el dispositivo utilizado para extraer y aprovechar la energía del viento, también llamado aerogenerador, necesitamos saber de cuánto viento disponemos en el sitio que nos interesa. Para esto necesitamos hacer mediciones del recurso eólico por al menos uno o dos años, de tal manera que podemos estimar la energía que se podría producir con los aerogeneradores. Pensemos entonces en cómo podemos medir el viento. Uno de los instrumentos utilizados para ello es el anemómetro, un dispositivo que suele colocarse en torres altas conocidas como torres meteorológicas. Cuando el viento sopla, las copas del anemómetro se mueven y hacen girar un eje; con base en qué tanto gira, podemos saber qué tan rápido sopla el viento. Los anemómetros no trabajan solos en las torres meteorológicas, también se instalan otros sensores que pueden medir temperatura ambiente, humedad, radiación solar, entre otras características del ambiente.

Entonces, parece tarea fácil poder determinar dónde sí y dónde no instalar aerogeneradores; sin embargo, medir el viento para elegir sitios con potencial en todo un océano no es tan sencillo como instalar una torre y poner un

*Imagen generada con Gemini con el prompt: «El dibujo en acuarela del malecón en una ciudad costera desde donde se puedan ver aerogeneradores con la puesta de sol de fondo, mientras personas caminan a lo largo del malecón».*



anemómetro. Quizás podamos usar anemómetros sobre barcos o boyas o, incluso, podríamos usar sensores LIDAR (que utilizan luz láser para medir las velocidades del viento), pero necesitaríamos distribuirlos en todo el océano durante al menos un año para poder identificar los sitios con buen viento. Para entender el comportamiento del viento en el mar, sacamos ventaja de una especie de máquina del tiempo climática que se conocen entre la comunidad científica como modelos de reanálisis. Estos modelos toman y mezclan mediciones reales con simulaciones físicas de la atmósfera. El resultado es una reconstrucción del clima, hora por hora, durante décadas. En el proyecto en el que trabajé durante mi doctorado se analizaron casi cuarenta años de información horaria proveniente de un reanálisis. Con ello fue posible entender cómo se comporta el viento y su potencial para generar energía, año tras año, sobre el Golfo de México.

Los datos que nos dan los reanálisis permiten estimar la velocidad del viento a la altura donde girarán las aspas de una turbina eólica moderna. Y eso es clave, porque el viento no se comporta igual cerca del agua que a 100 metros de altura. Una vez que identificamos los sitios idóneos para instalar turbinas eólicas y sabemos la velocidad de viento a la altura de las aspas, el siguiente paso es calcular la energía que podríamos generar. Aquí entra en juego la «curva de potencia», que es una gráfica que nos ayuda a traducir la velocidad del viento en electricidad. Cada turbina tiene su curva de potencia. La turbina que consideramos en nuestro trabajo es muy similar a las que actualmente funcionan en países líderes en el campo de la energía eólica como China, Holanda o Reino Unido <sup>[2]</sup>.

Para saber si un lugar es realmente bueno para aprovechar la energía eólica se utiliza el «factor de planta», un indicador que compara la energía que realmente produce una turbina con la que generaría si trabajara siempre a máxima potencia. Puede imaginarse como el porcentaje de tiempo que la máquina opera cerca de su máximo rendimiento. Cuanto más alto es este valor, más atractivo resulta el sitio.

En los resultados de nuestro trabajo pudimos identificar varias zonas del Golfo de México donde las velocidades de viento son constantes y suficientemente intensas a lo largo del año. En estos lugares, las turbinas eólicas podrían generar energía de manera que su instalación sea viable económicamente. Pero no basta con tener altas velocidades del viento. Instalar turbinas en el océano implica considerar los requerimientos propios de la tecnología, tales como la profundidad del agua, la distancia a la costa, las áreas naturales protegidas y los límites territoriales del país. Algunas regiones son demasiado profundas, mientras que otras albergan ecosistemas naturales que deben conservarse. Al analizar y superponer todas estas restricciones sobre los mapas de viento, el espacio disponible se reduce, pero ahora muestra con mayor claridad dónde



realmente sería conveniente instalar turbinas. Después de descartar las zonas que presentan las restricciones que mencionamos, identificamos cuatro áreas potenciales en las que es viable la instalación de granjas eólicas (un conjunto de aerogeneradores en una misma zona que generan electricidad a gran escala, ya sea en tierra o en el mar): al este de Tamaulipas, al norte de Yucatán y al noroeste y suroeste de Campeche. En estas zonas el factor de planta alcanza valores altos, cercanos al 50% en los mejores casos. Dicho de otra forma, en estos lugares, las turbinas podrían producir electricidad casi la mitad del tiempo a plena capacidad, un valor comparable con las instalaciones existentes en otros lugares. Además, el viento presenta una estacionalidad clara; es decir, hay meses de mayor producción, en invierno, ideales para cubrir picos de demanda de energía, y otros más tranquilos, en verano, que podrían aprovecharse para hacer mantenimiento a las máquinas.

Aunque todavía se requieren mediciones directas, estudios ambientales y análisis económicos más detallados, este primer acercamiento muestra un panorama alentador donde el Golfo de México, históricamente conocido por la industria petrolera, podría convertirse en un símbolo de transición energética. México cuenta con viento, conocimiento científico y necesidad de energía limpia. Tal vez el siguiente capítulo de la energía mexicana se encuentre girando en el horizonte, soplando sobre las olas. 🌞

*Imagen generada con Gemini usando el prompt: «La representación de un mapa de México, como si fuera una acuarela, con dibujos de aerogeneradores únicamente al este de Tamaulipas, al norte de Yucatán y al oeste de Campeche. El mapa únicamente debe tener aerogeneradores en esos puntos y no tener ningún texto».*



## Referencias

- [1] D. A. Canul-Reyes, O. Rodríguez-Hernández, y A. Jarquin-Laguna, «Potential zones for offshore wind power development in the Gulf of Mexico using reanalyses data and capacity factor seasonal analysis», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 68, pp. 211–219, abr. 2022. doi: 10.1016/j.esd.2022.03.008
- [2] Global Wind Energy Council, *GWEC's Global Offshore Wind Report*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.gwec.net/reports/globaloffshorewindreport>

# Minerales críticos: el eslabón geológico que sostiene la transición energética

David Yáñez-Dávila y Antoni Camprubí

**Autoría situada:** David Yáñez Dávila actualmente está realizando una estancia posdoctoral del Programa de Becas Posdoctorales en la Universidad Nacional Autónoma de México en el Instituto de Geología de la UNAM. Su línea de investigación principal es la exploración de recursos geotérmicos. Antoni Camprubí Cano es Investigador Titular B del Instituto de Geología de la UNAM y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel III, sus líneas de investigación principal son el estudio de depósitos minerales y metalogénesis en general.

Imagina por un momento un mundo movido por el sol, el viento, el mar, el calor interno de la tierra; con autos y motos eléctricos deslizándose silenciosamente por las calles, parques eólicos en las costas o baterías que guardan energía para la noche. Esta es la gran promesa de nuestra época: movernos hacia una economía que busca reducir y depender menos de combustibles fósiles, basada en energías renovables, movilidad eléctrica, redes inteligentes e inteligencia artificial con menor impacto ambiental. Sin embargo, detrás de esta visión ecotópica, hay una cadena geológica que lo sustenta todo, que empieza en la corteza terrestre y termina en la cotidianidad de tu vida. Entonces, ¿qué nos dice la geología sobre la velocidad y los límites de esta transición energética? La pregunta de fondo es tan simple como incómoda.

## ¿Alcanzarán los minerales críticos para sostener el ritmo de la transición energética?

Un artículo de revisión reciente en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, «Critical Minerals»<sup>[1]</sup>, subraya un punto que a veces se queda fuera del debate público-científico: la transición energética no solo necesita de innovación tecnológica y voluntad política; necesita de minerales en grandes cantidades. En particular, depende de lo que hoy se suelen llamar minerales críticos, que son ricos en elementos como el cobre, níquel, cobalto, litio y las tierras raras; estas últimas son protagonistas silenciosas de la transformación energética.

## De molinos simples a tecnologías con recetas complejas

En el pasado, muchas tecnologías energéticas se fabricaban con pocos materiales; por ejemplo, un molino tradicional podía construirse con madera, roca, hierro y tela. En cambio, las tecnologías verdes como los autos eléctricos, una batería de almacenamiento, una turbina eólica o un panel solar integran más componentes y requieren más variedad de elementos. Es como pasar de una receta casera a una receta sofisticada: hay muchos ingredientes, algunos de ellos escasos, y varios difíciles de conseguir rápido. De hecho, hoy en día, los teléfonos, tabletas o relojes inteligentes contienen decenas de elementos diferentes, al igual que un vehículo eléctrico.

Por lo tanto, la transición energética no se sostiene solo con buenas intenciones e innovaciones, sino también con cadenas de suministro de minerales críticos. Si uno de estos minerales se vuelve difícil de obtener, ya sea por escasez geológica, problemas geopolíticos, impactos ambientales o retraso en permisos socio-ambientales, la transición podría frenarse, encarecerse o, algo peor, volverse desigual. El estudio antes mencionado pone en evidencia un punto de tensión fundamental: la demanda de minerales críticos crece rápido, pero abrir una mina, evaluarla, obtener permisos y producir a la escala necesaria suele llevar años.

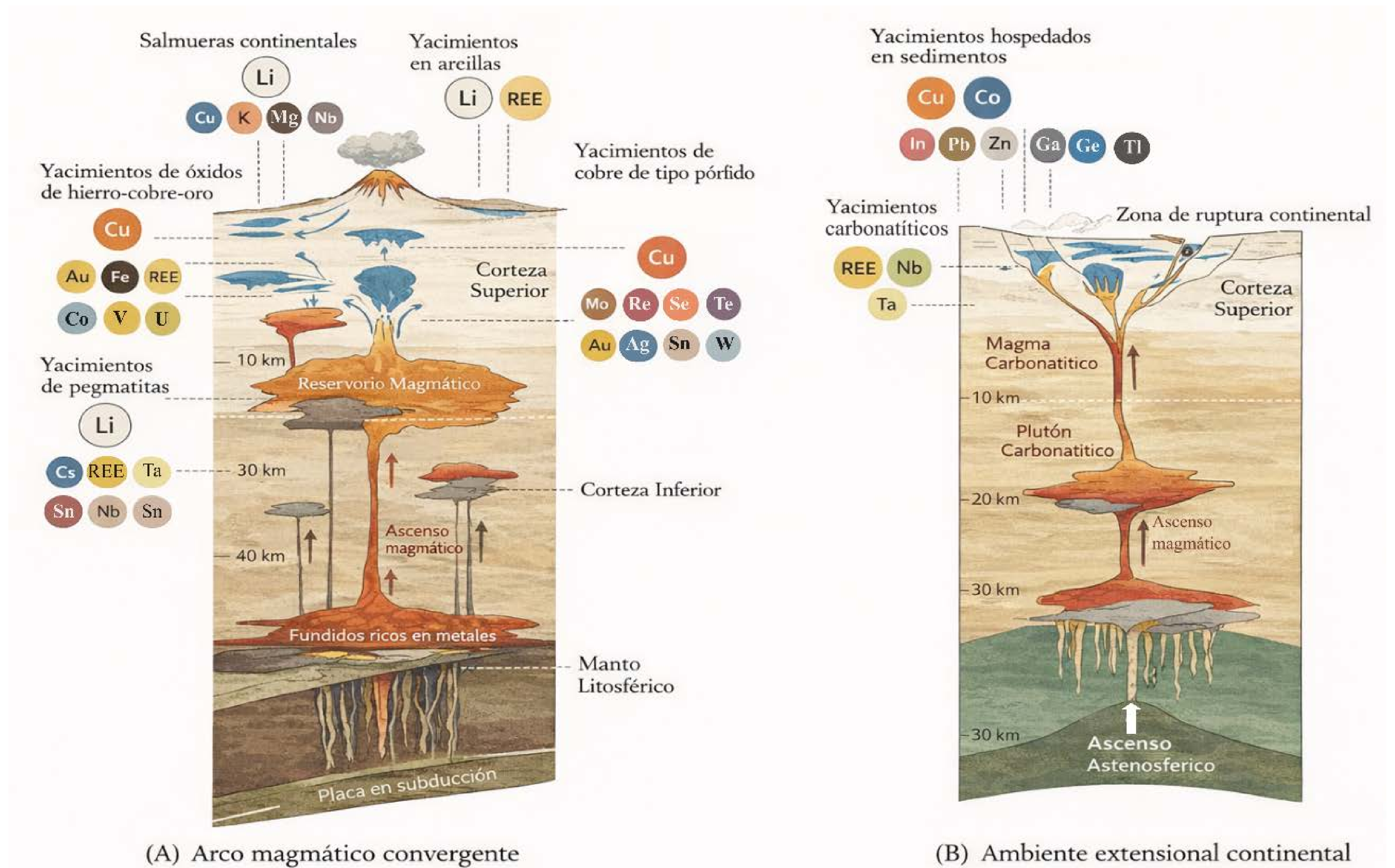
## Origen geológico del cobre, níquel, cobalto, litio y tierras raras: ¿cómo y dónde se forman?

Podríamos decir que estos elementos son las «vitaminas» de la transición energética, en proporciones pequeñas, pero decisivas para que baterías, redes y tecnologías renovables funcionen y escalen. El problema es que la disponibilidad de los minerales críticos de donde provienen estos elementos está geológicamente restringida; no aparecen en cualquier parte, ni en cualquier roca, ni necesariamente en cualquier época geológica. La Tierra los concentra mediante procesos geológicos lentos y específicos (Figura 1): magmas que ascienden, fluidos hidrotermales que transportan metales, meteorización intensa (proceso por el cual las rocas se alteran *in situ* por agentes físicos, químicos y biológicos) que «lava» las rocas durante miles o millones de años hasta formar depósitos aprovechables. Comentemos sobre cada uno de estos.

**El cobre** está asociado mayoritariamente a lo que se conoce como sistemas tipo pórfido, comunes en cinturones montañosos ligados a zonas de subducción de las placas tectónicas que generan magmas que pueden concentrar enormes volúmenes de metales. Por eso destacan como productoras importantes regiones como el Cinturón de Fuego del Pacífico, que abarca la Cordillera Occidental de Norteamérica, los Andes, así como los grandes archipiélagos de Asia oriental y el Pacífico.

**El níquel y el cobalto** a menudo aparecen juntos porque comparten ambientes geológicos. El níquel proviene sobre todo de sulfuros magmáticos y lateritas, que son suelos rojizos formados por intensa meteorización de rocas ultramáficas (rocas con un bajo contenido en sílice < 45 % y muy ricas en minerales máficos como el olivino y piroxenos) ricas en metales en climas tropicales. Cuba y Brasil hoy albergan yacimientos importantes de este tipo. Por su parte, el cobalto se obtiene comúnmente como coproducto del cobre y níquel en diversos tipos de yacimientos.

**El litio** tiene un origen doblemente interesante. Por un lado, está en ciertos tipos de rocas ígneas (roca formada directamente del magma o lava cuando se enfría y solidifica) llamadas pegmatitas (rocas con cristales gigantes); un ejemplo es Greenbushes, Australia, una de las minas de litio de roca más grandes del mundo. También se concentra en salmueras continentales donde lagunas y salares de alta montaña



concentran sales tras evaporarse el agua. Un ejemplo de ello es el llamado Triángulo del Litio en los Andes de Chile, Bolivia y Argentina. Además, existen salmueras geotérmicas, un tema particularmente atractivo para países con recursos geotérmicos como México.

**Los elementos de las tierras raras** suelen encontrarse en depósitos menos comunes. Un origen típico son las carbonatitas (rocas ígneas ricas en carbonato) que actúan como «cofres geoquímicos» capaces de concentrar lantánidos y otros elementos. Grandes yacimientos de tierras raras, como Bayan Obo en China o Mountain Pass en Estados Unidos, están asociados a estos complejos de carbonatitas. Otro origen son las arcillas de adsorción iónica en regiones tropicales, donde algunos elementos quedan «pegados» a minerales arcillosos. Hoy en día, este tipo de depósitos son una fuente importante en países asiáticos.

## Retos socioambientales: la transición también tiene huella

El hecho de que estos minerales sean críticos no solo se debe a su papel tecnológico, sino también a los desafíos para explorar-

los, extraerlos y procesarlos a la velocidad que demanda el mercado o bien a su accesibilidad geopolítica; he aquí la parte crítica. En términos simples, podemos tener claro el destino (energía limpia), pero la disponibilidad de materiales puede no crecer al mismo ritmo de esa ambición. Esto puede explicarse porque la transición verde apenas comienza: año con año se fabrican más vehículos eléctricos, más paneles solares, más baterías de respaldo, más aerogeneradores... Cada uno demanda unas cantidades significativas de estos minerales. Un reporte de la Agencia Internacional de Energía señala que un auto eléctrico utiliza seis veces más elementos críticos que un auto convencional de gasolina <sup>[2]</sup>, ¡seis veces más!

Por lo tanto, asegurar el acceso a estos minerales se ha vuelto una prioridad estratégica a nivel mundial. Países líderes en tecnologías limpias como China, Estados Unidos y varias naciones europeas invierten en minas,

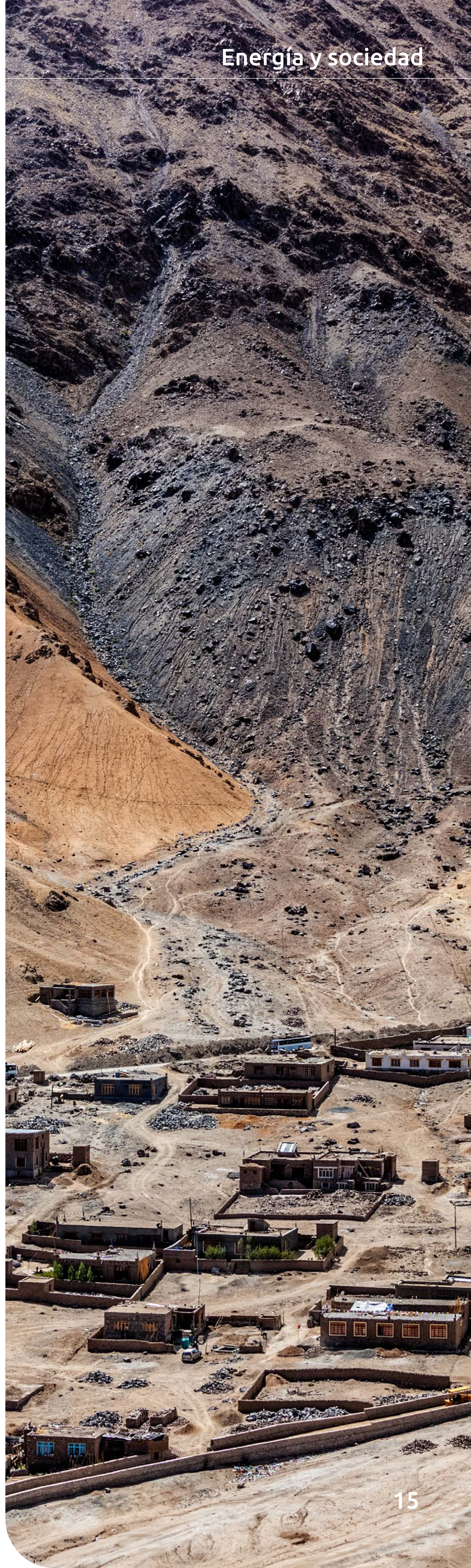
acuerdos comerciales e investigación para explorar, producir y reciclar más materiales. El riesgo no es solo técnico, también es geopolítico. Por ejemplo, en el caso del cobalto, hoy, la República Democrática del Congo produce cerca del 70 % del suministro mundial <sup>[3]</sup>, lo que genera una gran dependencia por este elemento. Si la industria de baterías necesita más cobalto, podría haber escasez y alzas de precio que frenen la transición energética. Algo similar se discute sobre las tierras raras, donde China domina buena parte de la cadena de producción. En el pasado han restringido la exportación, encendiendo alarmas en países importadores <sup>[4]</sup>. Estos ejemplos muestran por qué garantizar un flujo suficiente y diversificado de minerales críticos se volvió parte de las políticas energéticas. México, por ejemplo, recientemente nacionalizó su incipiente industria de litio para asegurarse que ese recurso estratégico beneficie al país.

Detrás de cada kilogramo de cobre, níquel, cobalto, litio o tierras raras utilizado en tecnologías limpias, hay un impacto que no debemos maquillar. La minería a gran escala no solo transforma el paisaje; también puede provocar cambios profundos en la cultura y la demografía de las comunidades cercanas. A esto se suma un altísimo consumo de agua y energía, la generación de toneladas de residuos y, cuando no se maneja con responsabilidad, la contaminación del aire, el suelo y los cuerpos de agua. Además, muchos de estos depósitos minerales se ubican en territorios de pueblos originarios o dentro de ecosistemas especialmente frágiles o vulnerables.

## La pregunta ética es inevitable: ¿cómo equilibrar la demanda global de estos recursos con los derechos de las comunidades locales y la protección ambiental?

Los autores del artículo de revisión aquí citado no se quedan en el diagnóstico, sino que apuntan a líneas de acción con impacto real:

- Explorar mejor y con ciencia más fina. Cuando se agotan los depósitos minerales



cercanos a la superficie, la exploración tiende a desplazarse hacia yacimientos más profundos o a regiones más aisladas. Esto demanda geociencia aplicada avanzada, datos con mayor precisión e innovación tecnológica.

- Acelerar sin «atropellar» permisos e infraestructura. Reducir tiempos en permisos y construcción de proyectos no debería significar sacrificar evaluación ambiental ni derechos comunitarios. El reto es mejorar procesos sin bajar estándares.

- Minería más sostenible y justa. Si la transición energética genera daños ambientales o conflictos sociales, pierde legitimidad. Reducir la huella humana en el medio, proteger biodiversidad y cuidar la salud y el bienestar de las comunidades no es algo «extra», sino que es parte del costo real.

- Reciclaje y economía circular. Recuperar metales de productos al final de su vida útil puede aliviar presión sobre nuevos yacimientos. Aquí entran enfoques como el análisis de ciclo de vida, «de la cuna a la tumba»<sup>[5]</sup>; idealmente, también «de la cuna a la cuna»<sup>[6]</sup>.



- Formación de especialistas. Hay escasez de profesionales en geología económica y evaluación de recursos. Sin gente formada, no hay descubrimientos; sin estos, no hay suministro para la transición energética.

## La transición energética también se escribe en piedra

A veces hablamos de energías renovables como si fueran etéreas: sol, viento, calor interno de la tierra, mareas, pero la realidad es más terrenal. La transición energética está anclada a la geología y cada batería, panel solar, turbina o cable nace de procesos naturales que la Tierra tardó millones de años en formar.

Entender esto no significa rendirse, más bien es una invitación a hacer mejor las cosas: planificar a largo plazo con criterios de sostenibilidad; innovar en reciclaje para recuperar el cobre, litio y tierras raras al final de su vida útil; mejorar tecnologías para reducir la dependencia de ciertos elementos; disminuir desperdicios, y exigir que la extracción sea compatible con la justicia social y la protección ambiental. Si queremos un futuro bajo en carbono, también tenemos que mirar el suelo bajo nuestros pies: la transición será sostenible solo si también lo es su cadena de minerales críticos. 🌱

### Referencias

- [1] M. Reich y A. C. Simon, «Critical Minerals», *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 53, núm. 1, pp. 141–168, 2025, doi: 10.1146/annurev-earth-040523-023316.
- [2] International Energy Agency, «The role of critical world energy in clean energy transitions», pp. 1–287, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [3] IRENA, *Geopolítica de la transición energética: los materiales críticos*. Abu Dabi: Agencia Internacional de Energías Renovables, 2023.
- [4] M. Schmid, «Rare Earths in the Trade Dispute Between the US and China: A Déjà Vu», *Intereconomics*, vol. 54, núm. 6, pp. 378–384, 2019, doi: 10.1007/s10272-019-0856-6.
- [5] ISO 14040:2006, «Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Amendment», *European standard*, vol. 1, núm. 4, p. 20, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/37456.html><https://www.iso.org/standard/23151.html>
- [6] W. McDonough, *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York: North Point Press, 2002.

# El mundo de lo pequeño al alcance de un vistazo: las maravillas de la microscopía electrónica aplicadas al análisis de películas de CdS

Irving Galindo Márquez, Melvia Carinne Mejía Vázquez, Imelda Antonia Pedraza Chan, Eliseo Rincón Suárez, y Anayantzi Luna Zempoalteca

**Autoría situada:** Irving Galindo Márquez es doctor en dispositivos semiconductores por la BUAP. Investiga materiales y películas delgadas aplicadas a biosensores y celdas solares, con publicaciones en revistas internacionales de ciencia de materiales. Melvia Carinne Mejía Vázquez es ingeniera en tecnología ambiental y doctora en dispositivos semiconductores por la BUAP. Su investigación se centra en materiales semiconductores para energías renovables, especialmente en celdas solares y diodos emisores de luz (LED). Imelda Antonia Pedraza Chan es docente e investigadora en ciencia e ingeniería de materiales. Estudia películas delgadas y materiales funcionales para dispositivos electrónicos emergentes, como memristores y sistemas de memoria avanzada. Eliseo Rincón Suárez es doctor en dispositivos semiconductores por la BUAP. Investiga películas delgadas de óxido de zinc y sus propiedades ópticas y eléctricas para aplicaciones electrónicas. Anayantzi Luna Zempoalteca es ingeniera en materiales y doctora en dispositivos semiconductores por la BUAP. Trabaja en el desarrollo de películas delgadas orgánicas y de óxidos metálicos para dispositivos electrónicos y optoelectrónicos.

## El «superpoder» de la ingeniería

Imagina tener un superpoder como el de Ironman. Tony Stark posee el poder de su propio ingenio; y es ahí donde una persona investigadora se convierte en un Ironman moderno: con la capacidad de ver lo que nadie más nota a simple vista y visitar el «mundo nano», una dimensión situada a la millonésima parte de un milímetro. Para explorar este universo, necesitamos una armadura especial: el microscopio electrónico de barrido (mejor conocido como SEM, por sus siglas en inglés). Puedes ver un esquema de un SEM en la Figura 1.

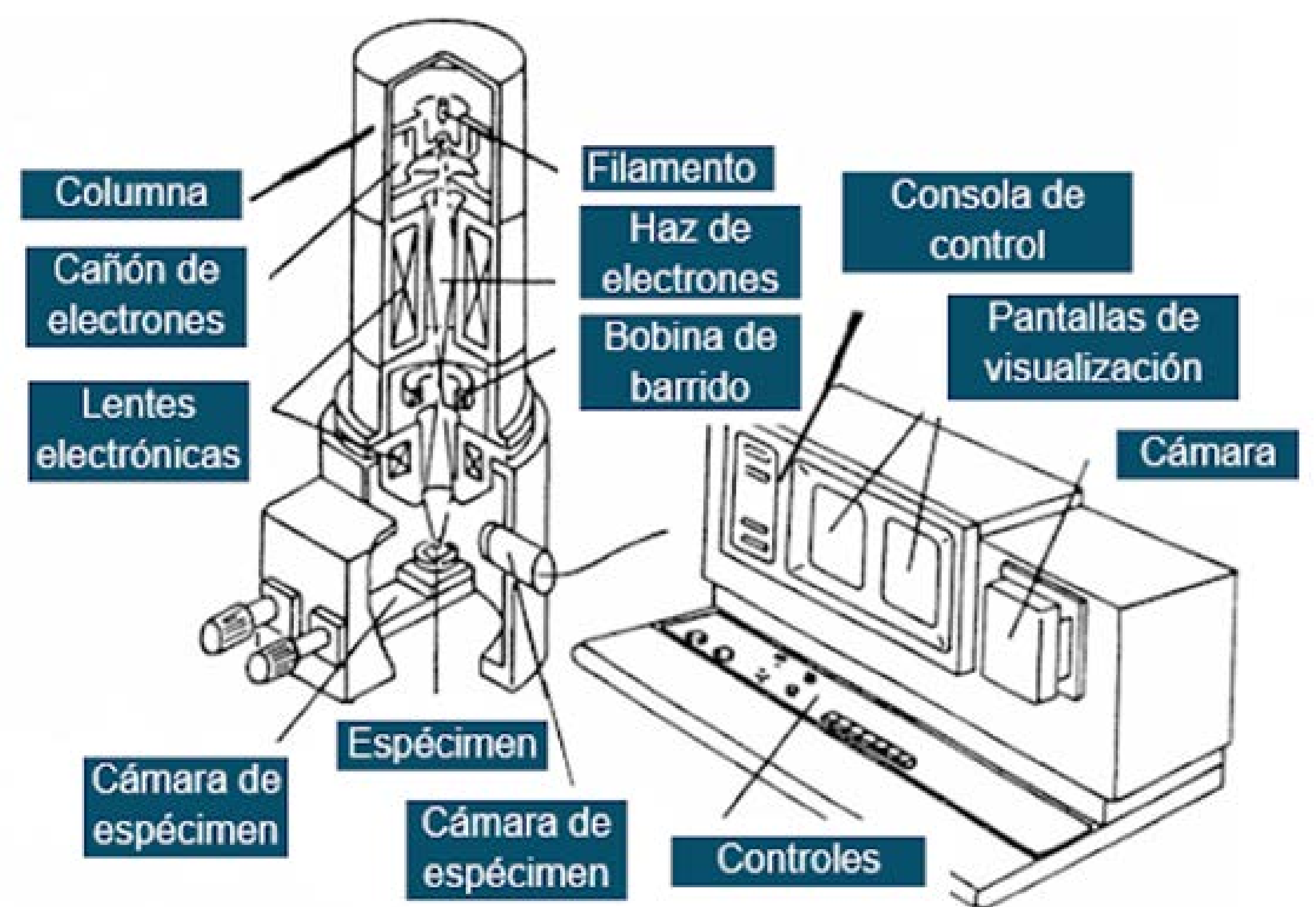


Figura 1. Partes principales de un microscopio electrónico de barrido (SEM) [1].

Antes de 1935, los microscopios se basaban únicamente en lentes de vidrio y luz visible, limitando nuestra visión a unas pocas micras. Sin embargo, en 1935, Max Knoll describió los principios de lo que sería el SEM, revolucionando la ciencia de la misma forma en que Stark revolucionó la tecnología con sus armaduras<sup>[1]</sup>. Hoy en día, este instrumento es capaz de lograr imágenes con 150 000 magnificaciones, alcanzando resoluciones de hasta 0.9 nanómetros (nm)<sup>[2]</sup>.

## El corazón de la armadura

Si diseccionamos un SEM, encontraríamos en la parte superior un cañón de electrones. Esta es la fuente de la «magia» y suele estar fabricada de tungsteno o hexaboruro de lantano (LaB6). El haz de electrones eyectado

por el cañón viaja a través de una columna de vacío, guiado por lentes electromagnéticas que enfocan el haz sobre la muestra del material que nos interesa analizar, por ejemplo, el sulfuro de cadmio (CdS) <sup>[3]</sup>. Al interactuar los electrones con el material, se generan señales (electrones secundarios y retrodispersados) que los detectores transforman en imágenes detalladas (conocidas como micrografías) de las películas del material.

### El uso de este superpoder en acción

El SEM es una herramienta indispensable en la investigación de películas delgadas para el desarrollo de nuevas celdas solares porque permite observar a nivel atómico cómo se depositó el material. A simple vista, parece una película uniforme, pero a nivel nanométrico podemos observar la forma y distribución de grano, que no siempre es homogénea; lo que impacta en las propiedades ópticas de la película y en cómo funcionarán las celdas solares. Un material del que se hacen estas películas es el CdS.

En el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en colaboración con la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la Univer-

sidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, se ha investigado por varios años este material. A continuación, te describimos brevemente cómo hacemos estas películas delgadas de CdS y de qué manera nuestro gran aliado, el SEM, nos ayuda a analizar este material tan importante para aprovechar la energía del sol.

El primer paso es depositar el sulfuro de cadmio sobre un sustrato de vidrio; para ello usamos la técnica de depósito por baño químico. La solución en la que se sumerge tiene los siguientes precursores químicos:

1. nitrato de cadmio, que nos aportará átomos de cadmio (Cd);
2. tiourea, que nos dará átomos de azufre (S), y
3. citrato de sodio, que será el «moderador», es decir, hará que la reacción no ocurra de forma tan rápida y desordenada.

Es importante regular la acidez (pH), para eso usamos hidróxido de amonio. Una vez lista nuestra solución, sumergimos láminas de vidrio en ella y las dejamos ahí durante 15 minutos a diferentes temperaturas: 25, 45 y 85 °C, con el objetivo de conocer a qué temperatura hay una mejor formación y estructura de la película. En la Figura 2 puedes ver el equipo que usamos para hacer este depósito químico.

## Descifrando la morfología

Al observar las micrografías a 500x (Figura 3), notamos diferentes tonos de gris. ¡Atención!, estos tonos no son colores reales, sino representaciones de la cantidad de electrones que llegan al detector. Las zonas más claras suelen indicar una mayor conducción eléctrica o cambios en el relieve del material. Leer este «mapa de electrones» es esencial para entender cómo es nuestro material a escala microscópica.

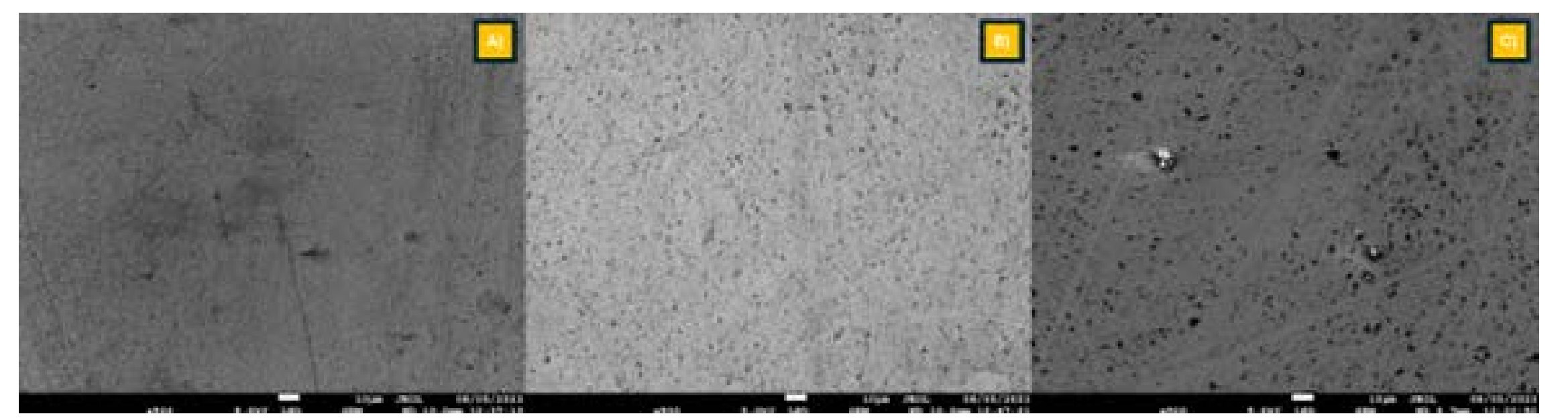


Figura 3. Imágenes de la morfología de películas de CdS depositadas sobre vidrio a 25 (A), 45 (B) y 85 (C) grados celsius amplificadas 500 veces.

A bajas magnificaciones (500x), las muestras parecen uniformes, pero el poder del SEM surge cuando aumentamos a 5 000x y 10 000x (Figuras 4 y 5). Con estas ampliaciones los detalles son inimaginables.

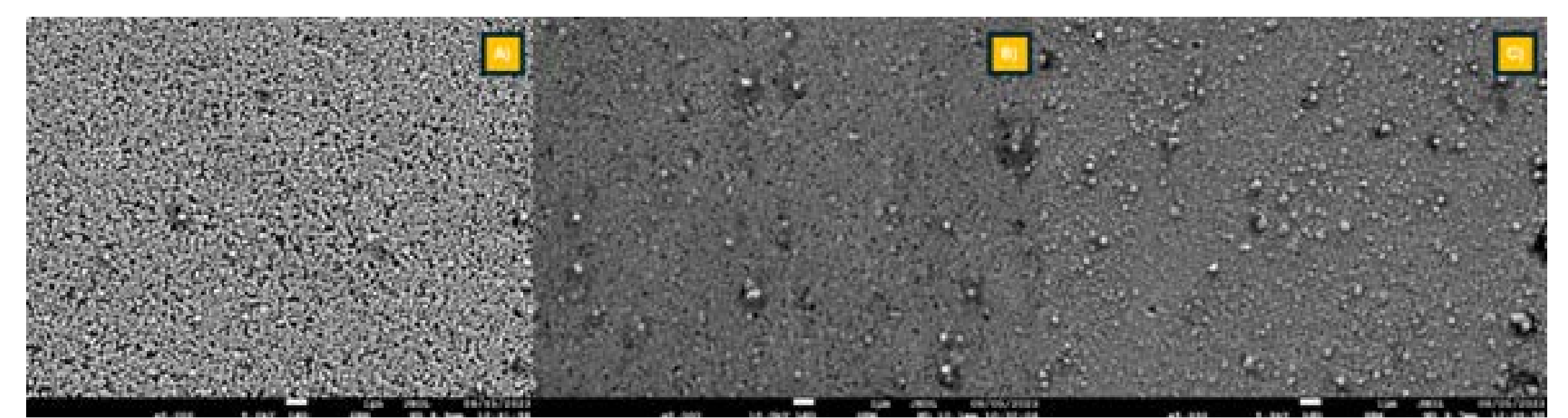


Fig. 4. Imágenes de la morfología de películas de CdS depositadas sobre vidrio a 25 (A), 45 (B) y 85 (C) grados Celsius amplificadas 5 000 veces.

A 25 y 45 °C, las películas presentan zonas sin depósito (manchas negras) y una distribución de granos irregular.

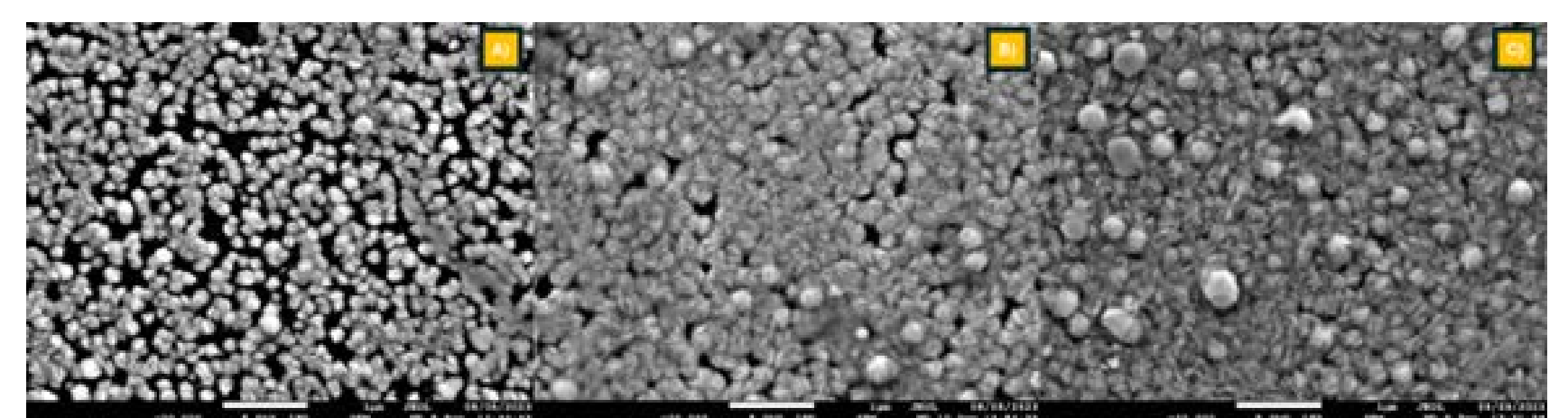


Fig. 5. Imágenes de la morfología de películas de CdS depositadas sobre vidrio a 25 (A), 45 (B) y 85 (C) grados Celsius amplificadas 10 000 veces.



Fig. 2. Recirculador automático para el depósito por baño químico de CdS.

Una vez que se tiene la película depositada, se lleva al SEM para conocer el detalle de esta. Las imágenes que te presentamos en este texto fueron capturadas en un microscopio SEM JEOL JSM7800F.

A 85 °C, la formación de la película de sulfuro de cadmio mejora notablemente. Los granos son más grandes, de forma «cuasi esférica» y cubren el sustrato de manera más homogénea.

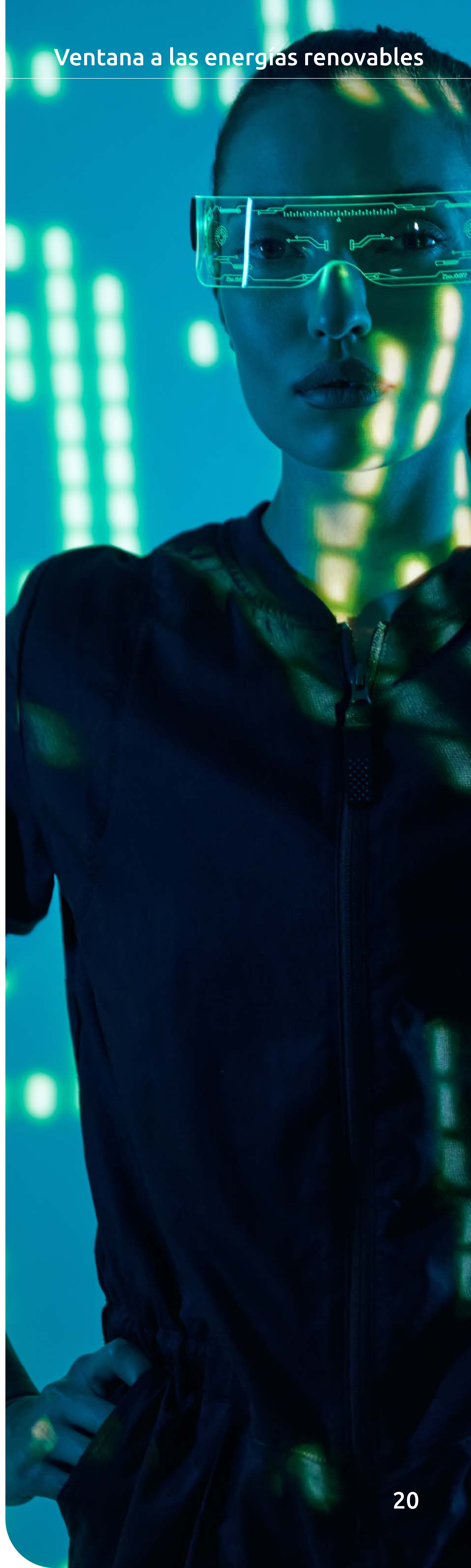
El microscopio nos revela que el exceso de brillo en algunos cúmulos puede ser indicativo de una deficiencia de azufre, es decir, existe una mayor concentración local de metal (cadmio), lo que afecta la eficiencia de una futura celda solar <sup>[4]</sup>.

Sin el SEM, no podríamos determinar que el depósito a 85 °C es el óptimo para formar películas de CdS homogéneas. Gracias a esta «visión de superhéroe», podemos perfeccionar los materiales que mañana darán energía limpia a nuestro mundo. ☀️

**Agradecimientos.** Las personas autoras agradecen al Dr. Nicolás Rutilo Silva González del Instituto de Física “Ing. Luis Rivera Terrazas” de la BUAP por las facilidades otorgadas para la obtención de las micrografías SEM.

### Referencias

- [1] A. Ul-Hamid, *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy*. Cham: Springer, 2023.
- [2] R. F. Egerton, *Physical Principles of Electron Microscopy: An introduction to TEM, SEM, and AEM*, 2nd ed. Cham: Springer, 2016.
- [3] L. Reimer, *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [4] A. S. Najm *et al.*, «Mechanism of Chemical Bath Deposition of CdS Thin Films: Influence of Sulphur Precursor Concentration,» *Coatings*, vol. 12, no. 10, p. 1400, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12101400>.



# Secado en modo inteligente: del sol a la receta en código

*Nicolás Iván Román Roldán, Alfonso Monzamodeth Román Sedano y Anabel López Ortiz*

**Autoría situada:** **Nicolás Iván Román Roldán** es doctor en ingeniería por el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, participante activo de proyectos de innovación tecnológica en el IER-UNAM e INIFAP. Su principal línea de investigación es el diseño de sistemas térmicos eficientes, principalmente tecnologías solares usando modelación CFD por volumen finito.

**Alfonso Monzamodeth Román Sedano** es doctor en ingeniería por la Facultad de Química, UNAM. Es investigador posdoctoral en el Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. Sus principales líneas de investigación comprenden el diseño, fabricación y caracterización de materiales avanzados mediante la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y simulación por elementos finitos.

**Anabel López Ortiz** es investigadora titular A del Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Es responsable del Laboratorio de procesamiento Solar de Alimentos. Sus investigaciones se enfocan en el proceso secado y cocción solar, filtros solares, desarrollos de secadores eficientes y estudios de compuestos en alimentos.

Los secadores solares son tecnologías que conservan alimentos de forma sustentable usando la energía del sol, pero su buen funcionamiento depende del control del proceso de secado, es decir, de la eliminación de agua en el producto. A finales del siglo XX, el diseño de los secadores solares comenza-

ba con una idea para atender una necesidad específica que daba lugar a un proceso difícil (Figura 1). Este proceso se repetía hasta que se encontraba la solución al problema. A partir del siglo XXI, se ha introducido el uso de herramientas computacionales como simulación y técnicas de inteligencia artificial que facilitan los cálculos. Hace 5 años, en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM) se inició una nueva era de secadores solares <sup>[1]</sup> donde los cálculos fueron realizados en computadora mediante dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Hoy en día, la inteligencia artificial ofrece nuevas formas de mejorar estos sistemas, combinando modelos de aprendizaje automático (machine learning) con algoritmos evolutivos. En la práctica, esto permite que la computadora analice toda la información disponible —como la temperatura, la humedad o el tipo de cultivo— para predecir el mejor momento de secado y ajustar el funcionamiento en tiempo real. Así, un secador solar tradicional se transforma en un sistema inteligente para ser más eficiente<sup>[2]</sup>.

## ¿Cómo un secador puede volverse más eficiente con un modelo de aprendizaje automático?

Qué tan bien y rápido se logre el secado depende del clima del lugar y de cómo está construido el secador. Si hay un cielo nublado, el secado tarda más; en caso contrario, si hay un cielo despejado, ocurre más rápido <sup>[3]</sup>. Por otro lado, un modelo de aprendizaje automático es una herramienta computacional que aprende a partir de datos, es decir, se entrena, en lugar de seguir reglas programadas paso a paso. En muchos casos, puede basarse en redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés), inspiradas en el funcionamiento del cerebro humano.

Figura 1. Proceso para el desarrollo de una tecnología



Estas redes están formadas por pequeñas «neuronas» conectadas entre sí, es decir, cada una recibe señales de sus vecinas, las procesa y pasa el mensaje a la siguiente.

En el secado solar, por ejemplo, un modelo puede aprender cómo influyen la temperatura, la humedad y el tiempo en el resultado del proceso. Una vez entrenado, puede predecir el comportamiento del secado y apoyar la optimización del funcionamiento del secador de manera rápida, incluso bajo condiciones nuevas, mejorando la eficiencia sin necesidad de resolver cálculos complejos en cada caso [5]. De hecho, se puede predecir cómo se comportará el secador en diferentes sitios, incluso en otras partes del mundo, sin gastar dinero en construir o probar muchos prototipos [4].

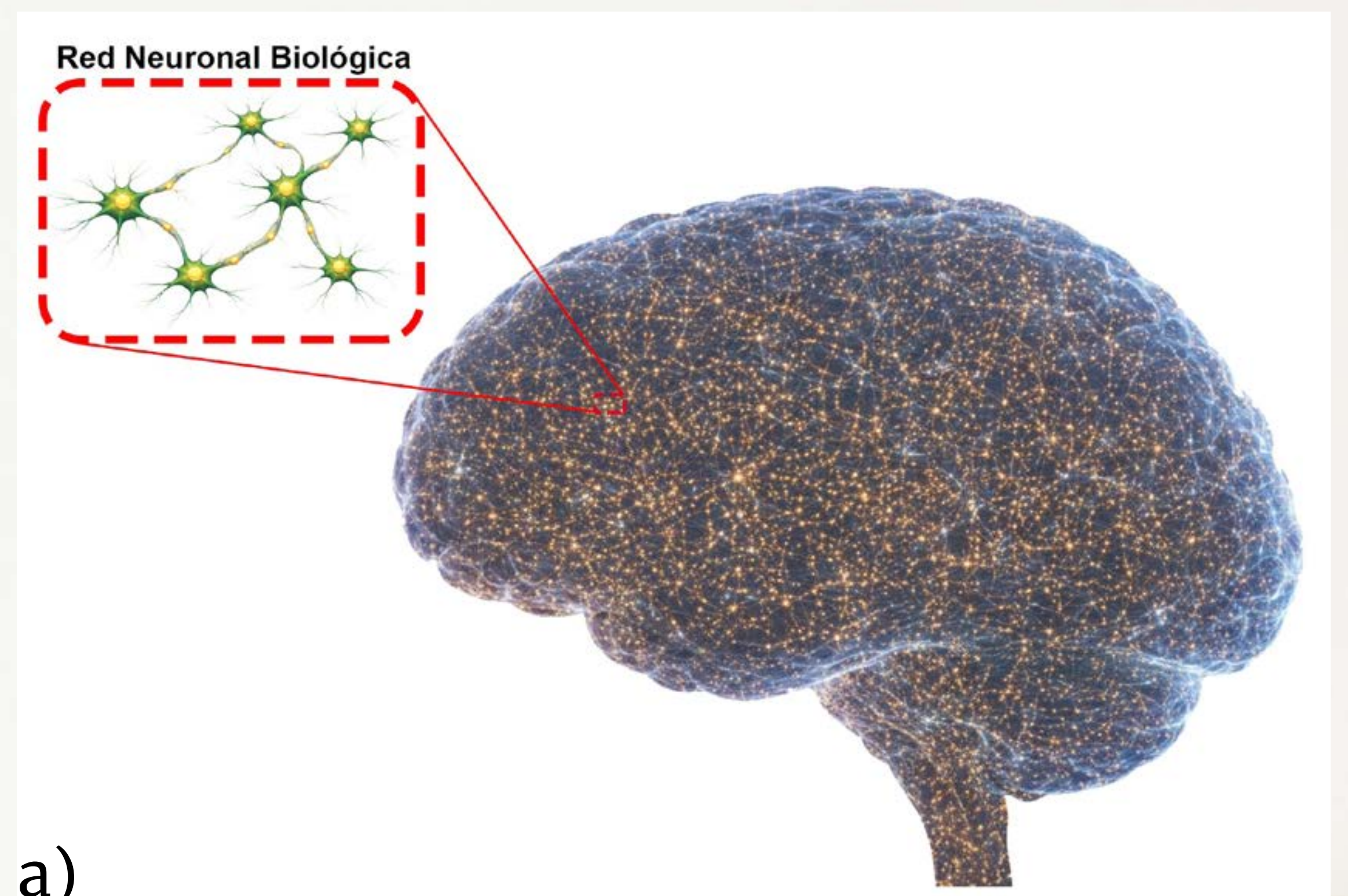
## Funcionamiento de una red neuronal artificial

Una red neuronal artificial se inspira en el funcionamiento de las neuronas biológicas (ver Figura 2a). Las entradas son los datos que recibe el sistema, como la temperatura y la humedad (algo así como las mediciones en un experimento). Estas serían las primeras señales que reciben las neuronas artificiales. Después de las neuronas de entrada están las neuronas de capas ocultas: programas que, en equipo, analizan esos datos. Cada una recibe la información, la combina con lo que sabe y busca patrones. Es como si en un laboratorio, en lugar de una persona revisando resultados, estuviera todo un equipo comparando notas para encontrar una tendencia. Finalmente, la salida representa la conclusión del modelo. Después de analizar la temperatura y humedad, la red podría predecir qué tan bien funciona el secador, acelerando los cálculos que normalmente son muy costosos computacionalmente.

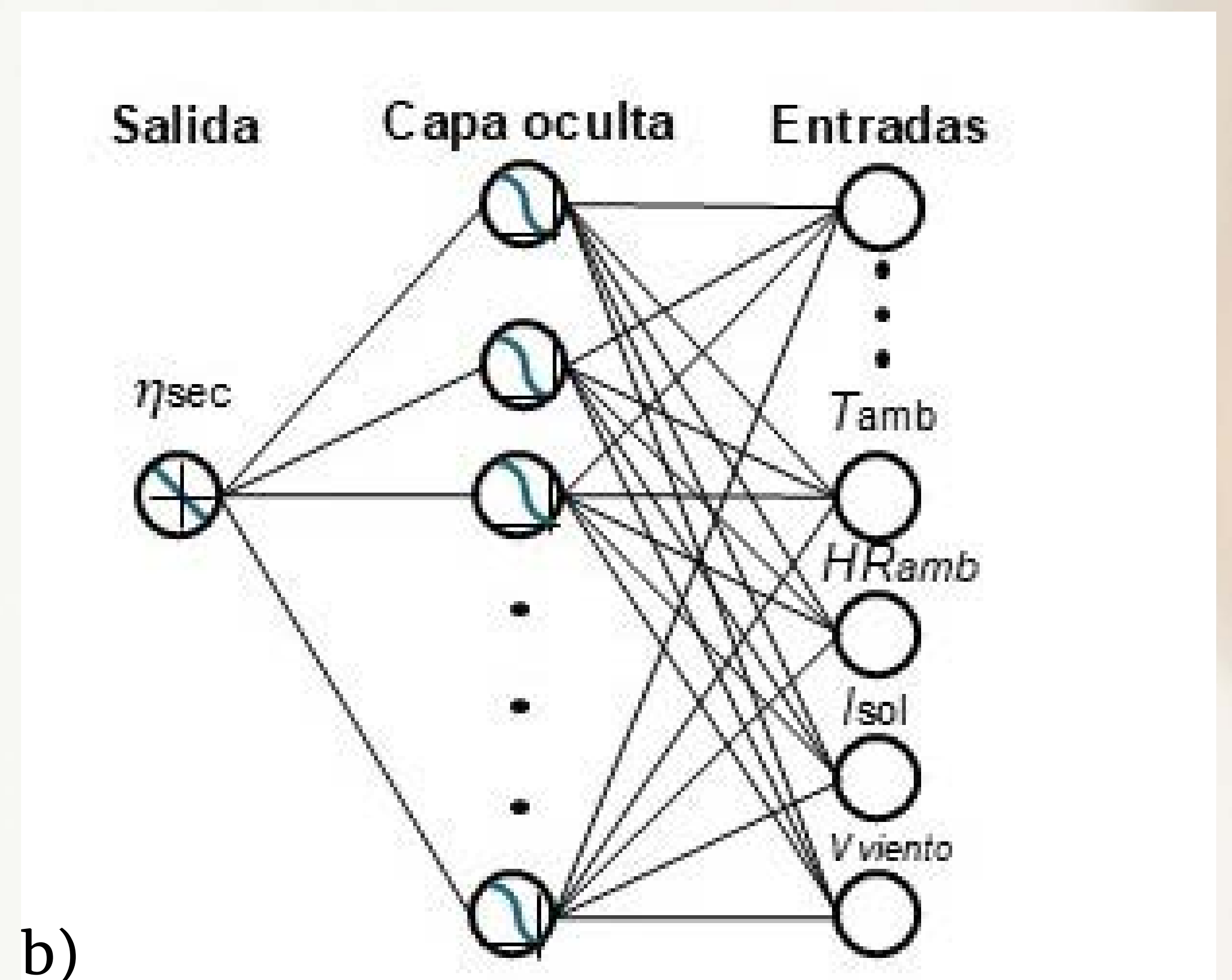
Con cada nuevo conjunto de datos, el modelo ajusta su aprendizaje y se vuelve más preciso, sin necesidad de realizar cálculos complejos manualmente en cada caso. En la Figura 2b se representa una estructura típica de una ANN que incluye entradas, capa oculta y salida.

## De los datos a la decisión: algoritmos genéticos como buscadores inteligentes

Para entrenar a la red neuronal se utilizan datos como si fueran el «diario» del secador solar: en cada entrada escribimos los valores de temperatura, humedad, viento y radiación solar, junto con el resultado final, es decir, qué tan bien se secó el producto.



a)



b)

Figura 2. Red neuronal biológica y representación típica de un arreglo neuronal. Se presenta una arquitectura de red neuronal artificial para predecir la eficiencia de un secador solar como función de variables que impactan.

Estos datos se dividen en tres partes: una para que el modelo aprenda, otra para que practique y una última para comprobar si realmente puede predecir sin memorizar. Un ejemplo de cómo sabemos si el modelo aprendió bien se presenta en la Figura 3a, que nos muestra que mientras más cerca queden los puntos de la línea de ajuste ideal, mayor precisión tendrá el modelo. Esto nos permite saber qué tan bien logró entender el comportamiento del sistema.

Una vez que el aprendizaje automático ya entiende el comportamiento del secador solar y puede predecir su desempeño a partir de las condiciones de operación, el siguiente paso es usar ese conocimiento para encontrar automáticamente la mejor forma de trabajar. Para esto se pueden emplear algoritmos genéticos, una técnica inspirada en la evolución natural <sup>[6]</sup>: en lugar de probar ajustes «a mano», el algoritmo propone muchas combinaciones posibles, se queda con las mejores y va mejorándolas generación tras generación. En la Figura 3b se muestra una representación típica del proceso, donde aparecen etapas como población inicial, selección, cruce, mutación y nueva generación, hasta converger en una solución de alto rendimiento. Después de esto, se hacen cálculos masivos con diferentes condiciones climáticas.

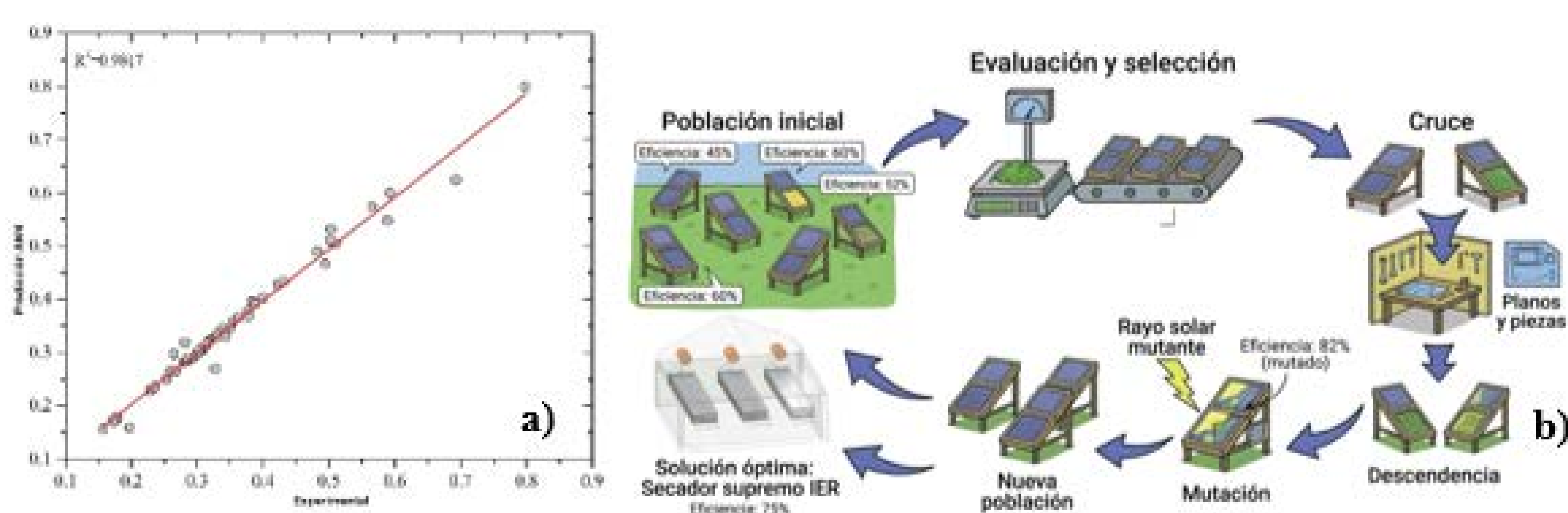


Figura 3. Representación típica del proceso de optimización por ANN.

### Algoritmo genético + aprendizaje automático = optimización rápida sin cálculos costosos

En este enfoque, el algoritmo genético funciona como el optimizador, mientras que el modelo de aprendizaje automático actúa como una calculadora rápida de eficiencia del secador. Cada «individuo» del algoritmo representa un conjunto de condiciones del secado (por ejemplo, valores de temperatura, flujo de aire o tiempo), y el modelo entrenado estima en segundos qué tan buena sería esa opción. Con esa evaluación, el algoritmo genético selecciona las mejores configuraciones, las combina y ajusta, repitiendo el proceso hasta identificar parámetros que maximizan el desempeño del secador. De esta forma, se logra una optimización eficiente sin necesidad de realizar simulaciones complejas o experimentar con todas las combinaciones posibles.

## Nuevos procesos para el desarrollo de tecnología

En la era de la IA, las soluciones se encuentran más rápido, con mejores respuestas de funcionamiento, mayores eficiencias y costos más bajos. En la UNAM trabajamos en conjunto el IER y el Instituto de Investigaciones en Materiales para desarrollar nuevas tecnologías como secadores solares utilizando una convergencia tecnológica entre diseño asistido por computadora (CAD), CFD, IA y manufactura asistida por computadora (CAM). Estas herramientas son una «cadena digital» (CAD → CFD → IA → CAM) donde cada herramienta se alimenta de la anterior: se crea un dibujo geométrico en un software CAD que define las dimensiones del equipo.

Después se somete a simulaciones CFD para ver cómo se comporta dicho equipo. A partir de estos resultados, las técnicas de IA predicen las configuraciones que funcionan mejor y ayudan a proponer nuevos diseños. Finalmente, el diseño se manda a fabricación. Esto traerá como resultado una nueva era de secadores solares supremos. 🌞

### Referencias

- [1] N.I. Román-Roldán, J.F. Ituna Yudonago, A. López-Ortiz, J. Rodríguez-Ramírez, and S. Sandoval-Torres, «A new air recirculation system for homogeneous solar drying: Computational fluid dynamics approach». *Renewable Energy*, vol 179, pp. 1727-1741, dic. 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.134
- [2] R. K. Ray, and A.C. Tiwari, «Optimization of Dimensional Factors Using AI Technique Affecting Solar Dryer Efficiency for Drying Agricultural Materials». *Computers, Materials & Continua*, vol 83(1), pp. 845-860, mar. 2025. DOI: 10.32604/cmc.2025.059435
- [3] N.I. Román-Roldán, A. López-Ortiz, J.F. Ituna Yudonago, P.K. Nair, J. Rodríguez-Ramírez, S. Sandoval Torres, Alex Martynenko, «A current review: Engineering design of greenhouse solar dryers exploring novel approaches», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2025. DOI: 10.1016/j.seta.2024.104137
- [4] P. Choubey, H. Sinhmar, and S. Tiwari, «A review on machine learning assisted solar drying system with phase change material», *Journal of Energy Storage*, vol 119, pp. 116403, Mar. 2025. DOI: 10.1016/j.est.2025.116403
- [5] A. H. Elsheikh, S. W. Sharshir, M. A. Elaziz, A.E. Kabeel, Wang Guilan, and Zhang Haiou, «Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review», *Solar Energy*, vol 180, pp. 622-639, January 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2019.01.037
- [6] A. Monzamodeth Román-Sedano, V. Aranda, E. Hernández-Mecinas, S. Espinosa Rangel, J. Villalobos, I.A. Figueroa, G. González. «Accelerated computational design of BCC refractory high entropy alloys using metaheuristics, CALPHAD, and artificial neural networks». *Materials Today Communications*, vol 47, 2025. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.113102.

# La liga de las superheroínas invisibles: cómo la ciencia usa bacterias y microalgas para limpiar el planeta

María del Socorro Ramos Ocampo

**Autoría situada:** María del Socorro Ramos Ocampo es geofísica de formación y candidata al doctorado Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR). Actualmente, se encuentra realizando una estancia de investigación doctoral en el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), donde se encuentra en la línea de investigación del área de bioenergía.

Cada día, llegan al mar miles de sustancias como metales pesados, petróleo, compuestos químicos industriales e incluso medicamentos. Estos contaminantes se caracterizan por durar mucho tiempo en el ambiente y por no eliminarse con los métodos tradicionales que utilizamos para tratar las aguas residuales. Los tratamientos fisicoquímicos y remoción mecánica de suelos utilizan filtros físicos o reacciones químicas artificiales para atrapar la suciedad, pero suelen ser costosos, consumir mucha energía y generar residuos secundarios que también pueden dañar el medio ambiente. Frente a este desafío, algunos de los contaminantes más persistentes parecen casi invencibles. En esta historia, los imaginaremos como villanos que amenazan los ecosistemas del planeta. Pero no son los únicos personajes. Contamos con aliadas que hacen frente a las amenazas: bacterias, microalgas y plantas que utilizan su propio metabolismo para transformar contaminantes en sustancias menos dañinas, a eso se le conoce como biorremediación.



Ahora, veamos cómo esta liga de superheroínas utiliza sus habilidades para enfrentar diferentes tipos de contaminación.

## ***Micrococcus yunnanensis*: la superheroína del océano contra el Doctor Sintético**

Desde las profundidades del océano, donde la luz apenas toca el fondo, hay una guerra química. El villano no porta armas, sino medicamentos. Se le conoce como el Doctor Sintético, un maestro del engaño que se infiltra en las corrientes marinas de manera invisible. Sus armas no son de este mundo natural, sino que utiliza fármacos, como analgésicos (como el paracetamol), antidepresivos (como la fluoxetina) y hormonas (como el etinilestradiol) para alterar a los animales acuáticos, aprovechando sus efectos sobre ellos como la alteración de su sistema nervioso para que pierdan sus instintos de supervivencia y no puedan defenderse de los depredadores. El plan del Doctor Sintético, aunque brillante, es cruel. Él aprovecha que



las plantas de tratamiento de aguas residuales no eliminan fármacos debido a que sus procesos son convencionales, pensados para remover sólidos y microorganismos, no para degradar compuestos químicos complejos. Él sabe que nuestras plantas de tratamiento convencionales sólo logran eliminar entre el 40% y el 60% de los fármacos, mientras que el resto fluye sin control al océano.

Un día, Doctor Sintético esperaba una nueva descarga de agua residual programada, porque esa agua contenía muchos residuos de paracetamol y fluoxetina, para utilizarlos en su plan malvado de contaminar el mar y crear un caos en la vida marina, y así seguir extendiendo la contaminación y el caos. Sin embargo, no contaba con que existiera una superheroína microscópica con una bioquímica prodigiosa llamada *Micrococcus yunnanensis*. A simple vista, parece una débil bacteria, pero en realidad su poder especial radica en la biorremediación: es decir, remueve los fármacos y limpia el agua, evitando el caos en el mar. La batalla inicia cuando *Micrococcus yunnanensis* captura el paracetamol, el etinilestradiol y la fluoxetina y los transforma

en compuestos más simples, logrando remover el 93 % del paracetamol, dejando en vergüenza a cualquier tecnología actual. Al capturar la fluoxetina, la remueve del agua un 80 % y lo hace un 65 % con el etinilestradiol, compuestos que suelen permanecer en el mar como «fantasmas químicos» durante años. Derrotado por la eficiencia de este pequeño titán, Doctor Sintético se esfumó en la oscuridad. Pero la guerra continúa.

Para ganar esta guerra, esta pequeña superheroína marina está realizando pruebas en sistemas de tratamiento de aguas residuales para reducir los contaminantes emergentes, es decir, contaminantes nuevos detectados en aguas residuales domésticas. Por eso es importante realizar pruebas en un sistema diseñado para microorganismos capaces de transformar contaminantes en sustancias menos dañinas o en moléculas más simples antes de enviar el agua tratada al ambiente, sistema también conocido como biorreactor biológico. De esta manera, esta superheroína microscópica no solo actúa en el laboratorio, sino que podría convertirse en una herramienta real para reforzar los tratamientos de agua que hoy resultan insuficientes <sup>[1]</sup>.

### ***Chlorella sorokiniana*, la purificadora del agua contra el Estrangulador de Ríos**

En los rincones más olvidados de nuestras costas, lagos o ríos, donde las plantas de tratamiento están ausentes y las aguas residuales fluyen sin control, surge una amenaza silenciosa: el Estrangulador de Ríos. Este supervillano nació del exceso de nutrientes, lo que hizo crecer descontroladamente a microorganismos que robaron el oxígeno y eliminaron toda chispa de vida. El Estrangulador de Ríos aprovecha el nitrógeno y el fósforo presente en las aguas de desecho; con esto, lanza una ofensiva de amonio que convierte lagunas, ríos y costas cristalinos en prisioneros del color verde espeso. Los peces son atrapados en un mundo sin oxígeno y pierden la batalla..., hasta que llega ella, una heroína microscópica llamada *Chlorella sorokiniana*. Aunque es una microalga diminuta, su misión es enorme: limpiar el agua contaminada y devolverle el equilibrio perdido.



Su estrategia es simple pero letal para el Estrangulador de Ríos; ella identifica el amonio y el fósforo, los absorbe con una voracidad asombrosa, ayudando a la restauración del equilibrio químico del agua. Viendo que esto está fortaleciendo a *Chlorella sorokiniana*, el Estrangulador de Ríos intentó competir con ella para ver quién «comía» más nutrientes. El plan maestro del villano era dejar sin nutrientes a nuestra heroína, pero no contaba con que, al escasear el nitrógeno, *Chlorella sorokiniana* no se rendiría. Ella cambió su metabolismo: dejó de usar los nutrientes para crecer y multiplicarse y comenzó a almacenar energía en forma de lípidos, es decir, grasas naturales que sirven como «comida de emergencia», ayudándola a prepararse para resistir cualquier condición extrema. ¿Y qué pasó con el Estrangulador de Ríos? Las cianobacterias y otros microorganismos que formaban al villano comenzaron a debilitarse. Ya no podían reproducirse ni extenderse. El Estrangulador de Ríos, al ser ahora de diminuto tamaño y sin fuerzas, prefirió huir.

*Chlorella sorokiniana*, al entender la importancia de conservar la limpieza de los ríos y

lagunas, deja tras de sí un tesoro para la humanidad, su propia biomasa. Los científicos han descubierto que este tesoro es rico en compuestos que pueden transformarse en biocombustibles y fuentes de energías renovables. Así, *Chlorella sorokiniana* demuestra que es posible proteger el ambiente y producir recursos al mismo tiempo, convirtiéndose en una pieza clave de la economía circular. Discreta pero poderosa, la Purificadora del Agua, como también se le conoce a nuestra heroína, nos recuerda que en la naturaleza incluso los organismos más pequeños pueden ser los mejores aliados para construir un futuro más limpio y sostenible [2].

### *Coelastrella sp.*, la esponja verde contra el Alquimista Tóxico

En las profundidades de las antiguas minas de Francia, donde el aire es pesado y el agua brilla con una energía peligrosa, se encuentra el Alquimista Tóxico. Es un supervillano cuyo poder proviene del uranio y de metales pesados. El uranio es un radionúclido, es decir, es un elemento químico inestable que emite radiación, como el uranio, y es capaz de corromper un ecosistema por milenios. En este ambiente extremo, la vida parece extinguirse. El Alquimista Tóxico disfruta envenenar el agua. Sus ataques son constantes y se aprovecha de que no existe tecnología humana eficiente para eliminar estos contaminantes peligrosos. Sin embargo, no contaba con que la misma naturaleza creara una microalga para remover lo que parece imposible, *Coelastrella sp.*

Mientras otros seres vivos mueren ante la radiación y los metales pesados, *Coelastrella sp.* crece activamente, manteniendo su fotosíntesis al máximo en medio del caos, siendo la luz y la esperanza para la vida en ese lugar. Gracias a su resistencia a ambientes extremos, como aguas con altas concentraciones de uranio, a su eficiencia para capturar metales peligrosos y a que su propia biomasa tiene valor — porque puede transformarse en lípidos con potencial energético —, *Coelastrella sp.* se perfila como una heroína clave en la biorremediación de aguas contaminadas con uranio y metales pesados. Cuando el Alquimista Tóxico intentaba corromper el entor-



no con uranio y metales pesados, la esponja verde llegó a tiempo y activó su protocolo de bioacumulación, es decir, empezó a «secuestrar» el metal pesado y el uranio dentro de sus propias paredes celulares. Le toma 7 días reducir el 55% de los contaminantes que el supervillano le lanzó, quedando atrapados en el cuerpo de la microalga. Destacamos su capacidad de retención de 600 mg de uranio por gramo de su masa. *Coelastrella sp.* marcó el destino del Alquimista Tóxico, haciendo que el agua ya no sea una zona de muerte, sino un santuario de recuperación.

Nuestra heroína no se retiró con las manos vacías. Su biomasa reveló su último secreto: es capaz de absorber metales pesados y otros contaminantes peligrosos, incluso aquellos que la minería deja como cicatrices en el agua y en el ambiente. Pero su lucha nos recuerda algo importante: las superheroínas también tienen límites. *Coelastrella sp.* puede limpiar, pero no puede hacerlo sola. Si no ayudamos mejorando nuestras tecnologías y evitando verter sustancias tóxicas, los villanos que creamos terminarán siendo más poderosos que cualquier aliado microscópico. Al final,

la lección es simple: en los ambientes más hostiles, la vida microscópica tiene el poder de limpiar el pasado, pero debemos hacer nuestra parte <sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup>.

Por cierto, «sp.» en el nombre de *Coelastrella sp.* es la abreviatura de la palabra en latín species, que significa «especie». Se usa cuando sabemos a qué género pertenece un organismo (*Coelastrella*), pero no tenemos certeza de la especie exacta.

### La alianza *Bacillus spp.*, el equipo imparabile contra Marea Negra

No todos los héroes trabajan solos. El equipo *Bacillus spp.* es un equipo de bacterias comunes del suelo, resistentes y capaces de sobrevivir en condiciones difíciles. Este equipo es efectivo cuando de luchar contra Marea Negra se trata.

Marea Negra es una supervillana que se forma cuando, por errores humanos, suceden derrames de petróleo. Estos accidentes o



descuidos afectan muy gravemente a la vida acuática y semiacuática. Cuando se derrama petróleo, los hidrocarburos forman una capa negra, espesa y pegajosa, impidiendo el paso de la luz, el agua y el oxígeno, lo que hace que aves, peces, corales y animales terrestres se asfixien y mueran con miedo y desesperación. Además, son compuestos tóxicos y persistentes (permanecen durante años y se filtran hacia las aguas subterráneas), poniendo en riesgo ecosistemas y fuentes de agua potable. Por eso, eliminar o disminuir los derrames del petróleo no es solo una cuestión de limpieza visual, sino una necesidad urgente para recuperar la salud del ambiente.

Dentro de la alianza *Bacillus spp.*, cada superhéroe tiene una misión específica. *Bacillus pumilus* tiene la capacidad de producir biosurfactantes; estos son sustancias naturales que ayudan a dispersar en pequeñas gotas el petróleo, evitando que quede atrapado en el suelo y facilitando su eliminación. Ahí entra en acción *Bacillus cereus*, quien continúa la lucha contra Marea Negra. *Bacillus cereus* remueve las pequeñas gotas de hidrocarburos del petróleo; en pocas palabras, transforma estas pequeñas gotas en moléculas más simples, las cuales aprovecha como fuente de carbono o alimento principal para tener energía. Gracias a esta alianza, se ayuda a que, con el tiempo, estos compuestos tóxicos sean sustancias que se puedan aprovechar por la vida. Por eso, a estas especies se les conoce como biorremediadoras. Afortunadamente, esta alianza es real; personas científicas han demostrado que estas dos especies juntas pueden eliminar más del 84% del petróleo, demostrando que la cooperación también es clave en el mundo microscópico [5].

## Las Microalgas Guardianas: el escudo vivo contra la contaminación radiactiva

Cuando el enemigo es extremo y altamente peligroso, como los residuos radiactivos, entran en acción las Microalgas Guardianas.

Estas heroínas microscópicas han demostrado que pueden atrapar y reducir isótopos radiactivos como el cesio-137 y el estron-

cio-90, dos contaminantes asociados a residuos nucleares y altamente dañinos para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Gracias a su capacidad para retener estos elementos dentro de su estructura celular, las microalgas actúan como un escudo biológico, evitando que la radiación se disperse en el agua y llegue a peces, plantas y otros organismos. Así, incluso frente a uno de los villanos más peligrosos del planeta, la naturaleza demuestra que tiene defensores listos para protegerla.

En estudios controlados, estas microalgas lograron inmovilizar hasta el 98 % del estroncio radiactivo, incorporándolo a su biomasa o fijándolo en su superficie celular. Este proceso ocurre mediante bioacumulación y adsorción, mecanismos que les permiten capturar los radionúclidos y evitar que se dispersen en el agua.

Al quedar retenidos en la biomasa algal, estos contaminantes dejan de estar disponibles para los organismos acuáticos, reduciendo su entrada a la cadena alimentaria, donde



podrían causar daño celular, alteraciones genéticas y efectos tóxicos en peces, invertebrados y, eventualmente, en los seres humanos. De esta forma, las microalgas actúan como un verdadero escudo biológico frente a la contaminación radiactiva.

Son un ejemplo de cómo la vida microscópica puede enfrentar incluso los retos más extremos creados por el ser humano<sup>[6]</sup>.

## **FITO, los guardianes del suelo: la defensa natural frente a los herbicidas**

Los herbicidas, compuestos químicos usados para eliminar malezas en la agricultura, son un problema porque persisten durante largos periodos en el suelo, pueden afectar microorganismos benéficos, contaminar aguas subterráneas y representar un riesgo para la salud humana y la biodiversidad.

En los suelos contaminados por herbicidas aparece FITO, símbolo de la alianza en la rizosfera, la delgada zona del suelo que rodea las raíces donde plantas y microorganismos trabajan juntos.

El trabajo en equipo es notorio en esta alianza, las primeras en entrar en acción son las bacterias, removiendo los herbicidas tóxicos al transformarlos en sustancias menos dañinas. Las plantas como maíz, soja y alfalfa absorben a través de sus raíces estas sustancias más simples para almacenarlas o transformarlas en compuestos aún más simples, ayudando así a limpiar el suelo de manera sostenible. Hablando seriamente, gracias al descubrimiento de este trabajo en equipo de las bacterias y plantas, se logró en algunos experimentos eliminar más del 80 % de herbicidas organoclorados persistentes, caracterizados por su lenta degradación y acumulación en el ambiente, lo que favorece la restauración natural de suelos contaminados <sup>[7]</sup>.



Cuando pensamos en soluciones a la contaminación ambiental, rara vez imaginamos organismos invisibles a simple vista. Sin embargo, la evidencia científica demuestra que microalgas, bacterias y plantas poseen capacidades reales y medibles para remover contaminantes como fármacos, hidrocarburos, metales pesados, isótopos radiactivos y herbicidas del ambiente. Cada uno de estos organismos actúa mediante mecanismos biológicos específicos, como la degradación enzimática, la adsorción, la bioacumulación o el trabajo conjunto en la rizosfera.

Lejos de ser ciencia ficción, la biorremediación es una estrategia sostenible que puede complementar o mejorar los métodos tradicionales, reduciendo costos energéticos y el impacto ambiental. No obstante, estos «superhéroes microscópicos» no actúan por sí solos. Su aplicación efectiva depende del conocimiento científico, del diseño de sistemas controlados y del uso responsable de la biotecnología.

La lucha contra la contaminación no se ganará con fuerza, sino con ciencia, cooperación y comprensión de la naturaleza. A veces, salvar el planeta no comienza con grandes máquinas, sino en una gota de agua, un puñado de suelo o una célula microscópica. 🌱

### Referencias

- [1] T. Palma, J. Valentine, V. Gomes, M. Faleiro, and M. Costa, «Batch Studies on the Biodegradation Potential of Paracetamol, Fluoxetine and 17 $\alpha$ -Ethinylestradiol by the *Micrococcus yunnanensis* Strain TJPT4 Recovered from Marine Organisms», *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 21, nov. 2022, doi: 10.3390/w14213365.
- [2] H. Song et al., «Insight into the mechanism of nitrogen sufficiency conversion strategy for microalgae-based ammonium-rich wastewater treatment», *Chemosphere*, vol. 349, feb. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140904.
- [3] C. Beaulier et al., «Characterization of a uranium-tolerant green microalga of the genus *Coelastrella* with high potential for the remediation of metal-polluted waters», *Science of The Total Environment*, vol 908, jun. 30, 2023. doi: 10.1101/2023.06.29.546994.
- [4] M. Qader and Y. Shekha, «Role of Microalgae in Environmental Biotechnology to Remove Heavy Metals», *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*, vol. 3, no. 1, pp. 174–184, feb. 2023, doi: 10.53293/jasn.2022.5346.1183.
- [5] K. Patowary, R. Patowary, M. C. Kalita, and S. Deka, «Development of an efficient bacterial consortium for the potential remediation of hydrocarbons from contaminated sites», *Front. Microbiol.*, vol. 7, no. JUL, jul. 2016, doi: 10.3389/fmicb.2016.01092.
- [6] T. Y. Kim, H. M. Park, Y. S. Song, and U. J. Lee, «A Study on the Decontamination of Cs-137 and Sr-90 Contained in the Liquid Radioactive Waste Discharged from the Spent Fuel Storage Tank Using Microalgae», *Resources Recycling*, vol. 31, no. 5, pp. 20–25, oct. 2022, doi: 10.7844/kirr.2022.31.5.20.
- [7] G. Ö. Ergüven and G. Demir, «Evaluation of the Detoxification Potential of *Micrococcus* Strains and Plants for Bioremediate Organochlorine Herbicides», *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, vol. 3, no. 3, pp. 353–364, sep. 2019, doi: 10.29329/ijjaar.2019.206.1.



# Sergio Cuevas: los fluidos, su mecánica y una mirada al comportamiento de la materia

Juan Manuel Valero

**Autoría situada:** Juan Manuel Valero es escritor, divulgador de la ciencia, productor de la serie radiofónica *La araña patona* y colaborador permanente de las publicaciones del IER-UNAM.

La naturaleza de la materia cobra vida cuando observamos cómo los fluidos responden a fuerzas y condiciones cambiantes.

Para entender un poco más sobre su comportamiento, de la mano del doctor Sergio Cuevas García, físico e investigador del Instituto de Energías Renovables, exploraremos la mecánica de fluidos, una rama de la física que estudia cómo se mueven líquidos y gases, y qué nos revelan sobre el universo.

## Verter el conocimiento en un recipiente

En el mundo físico los fluidos nunca reposan. El agua de un río, el aire que respiramos o el plasma dentro de una estrella se desplazan porque obedecen leyes precisas. Comprenderlas exige preguntarnos qué hace que un fluido se mueva, cómo reacciona ante obstáculos y qué fuerzas lo moldean.

El doctor Cuevas introduce el tema con una mirada casi poética: «Los fluidos no sólo fluyen, cuentan historias de equilibrio y cambio».

Detrás de esa frase late la esencia de la física: buscar patrones que expliquen la armonía de la naturaleza.

## Estática de fluidos

Cuando un fluido está quieto, la calma aparente esconde un equilibrio de presiones. Cada punto del líquido sostiene el peso de las partículas que tiene encima.

Cuevas así lo explica: «La presión en un fluido en reposo aumenta con la profundidad».

**«No es un detalle trivial; muestra cómo la gravedad actúa sobre cada partícula. Sin embargo, la presión actúa en todas direcciones, no sólo en la dirección vertical».**

De esa observación nace el principio de Pascal: toda presión aplicada a un punto se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y en todos los puntos del fluido. Gracias a ello funcionan desde los frenos y gatos hidráulicos hasta los elevadores.

## Dinámica de fluidos

Cuando el fluido se pone en movimiento, la física describe cómo cambian velocidad y presión. En este territorio reina la ecuación de Bernoulli, que revela una relación inversa entre ambas magnitudes.

Sergio Cuevas lo explica con ejemplos cotidianos: «En un río que se estrecha, el agua se acelera y la presión baja. Algo similar ocurre en las alas de un avión: el aire que pasa sobre la parte superior del ala se mueve más rápido que el aire que pasa debajo de ella, creando una diferencia de presiones que da lugar a la sustentación. La clave es que el ala debe desviar el aire hacia abajo, lo que se logra mediante la curvatura del ala o inclinándola con respecto a la dirección del viento. Una explicación alternativa la ofrece la tercera ley de Newton».

## Ondas y turbulencia

El movimiento de un fluido puede producir ondas —como las que deja una piedra al caer en el agua— o entrar en turbulencia, cuando el flujo se vuelve caótico.

Cuevas señala: «La turbulencia es el gran enigma de la mecánica de fluidos. Nos reta a encontrar orden en lo que parece indomable».

Esa turbulencia está presente en la atmósfera, en los océanos e incluso en el plasma solar: un recordatorio de que el caos también obedece reglas.

## No dejar de fluir

La mecánica de fluidos revela la belleza escondida en lo cotidiano. Lo que parece simple —una corriente de aire, una gota de agua— obedece leyes que conectan la Tierra con el cosmos.

Como afirma el doctor Sergio Cuevas García, del Instituto de Energías Renovables de la UNAM:

**«Estudiar la dinámica de los fluidos es como resolver un rompecabezas del universo. Nos ayuda a entender desde cómo se forman las tormentas hasta el comportamiento de las galaxias».**

Explorar esta rama de la física no sólo impulsa la tecnología y las energías limpias; también alimenta el asombro que nos acerca a comprender los secretos del universo y a apreciar la estética detrás de innumerables fenómenos naturales. 🌞



# El derecho a ser científicas

Daniela Cervantes Sedano

**Autoría situada:** Daniela es actualmente estudiante de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables (LIER) del IER-UNAM. Sus principales intereses incluyen la energía eólica terrestre y mar adentro, la simulación computacional y el desarrollo de políticas públicas en materia de energía y de género. En su tiempo libre disfruta del teatro, la literatura, el baile y la divulgación científica.

La primera vez que recuerdo haber jugado algo parecido a hacer ciencia tenía apenas cinco años. Todo empezó en mi jardín: recolectaba plantas, buscaba insectos, anotaba mis observaciones en mi libreta y bombardeaba a mis padres con más preguntas de las que podía decir en un minuto y claro que usualmente hacía un gran desastre. Casi años después me surgió otra pregunta relacionada: ¿cuándo es que las niñas decidimos (o nos planteamos siquiera la posibilidad de) ser científicas?

*El derecho a ser científicas* es una colección de testimonios de mujeres de diversas edades, líneas de investigación, universidades, contextos y experiencias. Este primer volumen consta de ocho historias: las de las científicas Ana Júlia Silveira (física de partículas), Dagmar Mariaca (estadística médica), Maura Ramírez (física de partículas), Isabel Cordero (astrofísica), Elizabeth Rovere (geofísica), Olinca Galván (física médica), Sara Centeno (bioquímica) y Xyoli Pérez (geofísica). Además incluye un prólogo de Julia Tagüeña, destacada divulgadora e investigadora emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

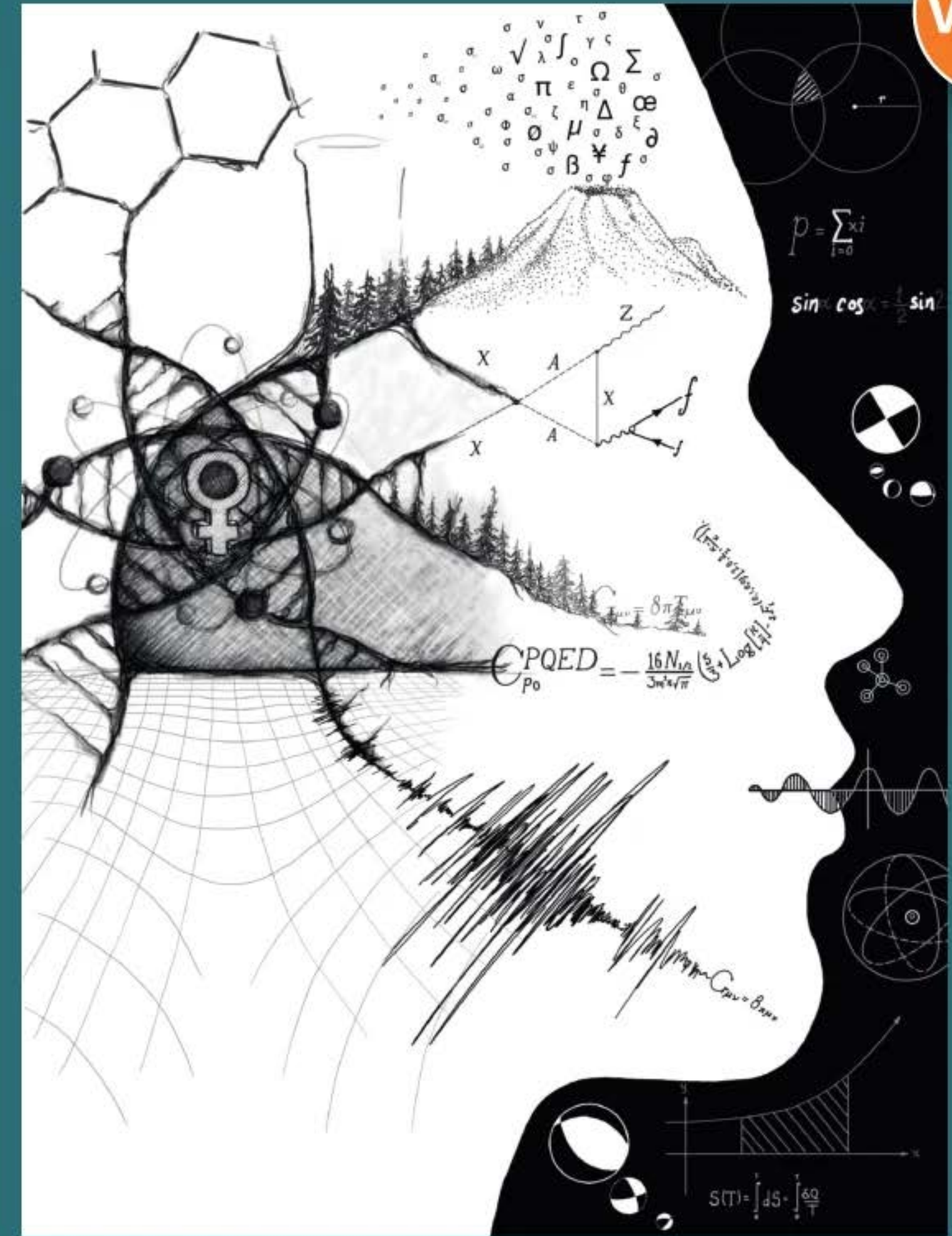
Unidas todas por su amor a la ciencia, a través de su pluma nos permiten conocer lo que para ellas significa ser científica, los retos que han enfrentado en su camino y lo que personalmente consideran que es necesario para alentar la vocación científica, en especial en niñas y jóvenes mujeres.

En este primer volumen, publicado por la Universidad de Colima en 2025 y coordinado por las investigadoras Dulce Vargas y María Tejada, las autoras comparten su historia, abordan temas como la decisión de dedicarse a la ciencia, los retos de ser de las pocas mujeres en campos masculinizados,

## EL DERECHO A SER CIENTÍFICAS

Colección de ensayos

VOL. I



Coordinadoras María Elena Tejada Yeomans • Dulce María Vargas Bracamontes  
Prólogo Julia Tagüeña Parga

la experiencia al migrar a otros países, la búsqueda de becas y oportunidades, el balance entre la vida profesional y la personal y, para quienes así lo desearon, la decisión de ser madres.

**Todas y todos deberíamos leer este libro, sin importar nuestro género, edad o vocación, porque en conjunto podemos empezar a construir un futuro donde ser científica no es un caso extraordinario, sino la normalidad,** y en el que plantearse desde niña seguir una carrera científica sea la realidad de millones de mujeres que vienen detrás de nosotros y nosotras.

Si aún estás considerando incursionar en la vocación científica, me gustaría decirte: ¡sí tienes la capacidad de hacerlo! Las páginas de la obra *El derecho a ser científicas* te mostrarán los caminos que han seguido algunas investigadoras, que podrían inspirarte y acompañarte en tu andar. Por otro lado, si ya eres una científica, encontrarás en sus páginas un abrazo, comprensión y consejos para situaciones que quizá viviste o estás viviendo. En ambos casos, seguramente eres inspiración para las mujeres que te rodean y las niñas que hoy, y en el futuro, se quieren dedicar a la ciencia; por lo mismo, te expreso mi admiración. 🌟

Descarga el libro aquí:

<https://libros.ucol.mx/index.php/dgp/catalog/book/142>



# Sé parte de nuestra comunidad

## estudiantil



**¡Conviértete en agente de cambio hacia un futuro sustentable!**

### Prestigio académico consolidado

Formación respaldada por la UNAM, institución líder con reconocimiento nacional e internacional.



### Oportunidades de movilidad internacional con beca

Programas para estudiar, investigar o colaborar en otras universidades del mundo.



### Planta académica multidisciplinaria

Profesorado con experiencia en diversas áreas que enriquece la formación integral del estudiantado.

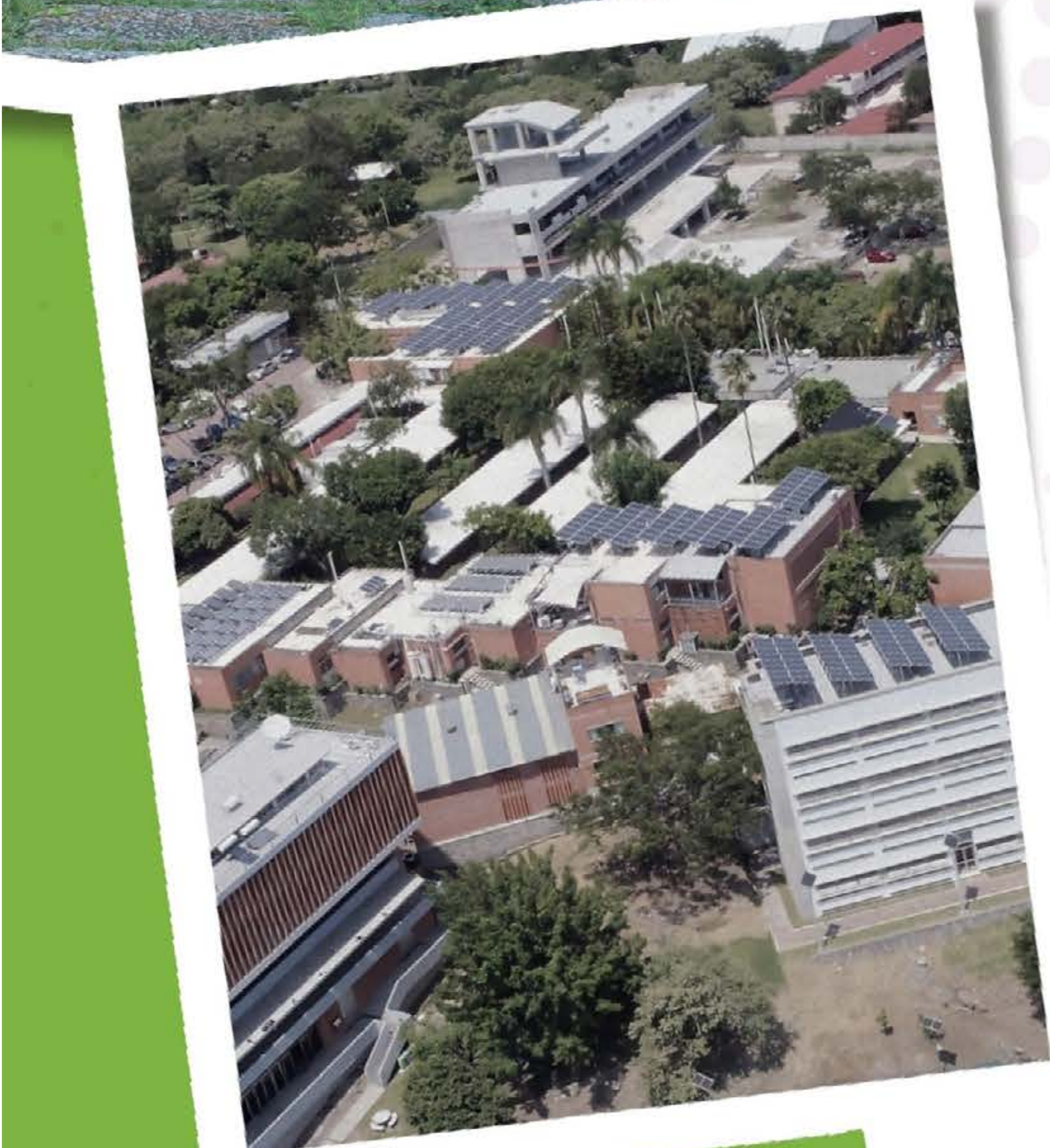


### Actividades culturales y deportivas

Espacios y programas que fomentan la creatividad, el bienestar y la vida universitaria.



### Consulta las convocatorias para Licenciatura y Posgrado



IER- UNAM  
Temixco, Morelos, México