

EXPERIMENTA

Revista de divulgación científica de la Universidad de Antioquia

Edición

20



UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA



Edi ción 20

Portada

Laboratorio del grupo GASURE. Fotografía: Dirección de Comunicaciones.

www.udea.edu.co/experimenta

Nos interesa saber tu opinión sobre esta publicación. Escríbenos tus sugerencias y comentarios a revistaexperimenta@udea.edu.co

E

n un mundo cada vez más consciente de la urgencia de abordar el cambio climático y garantizar un futuro sostenible, las energías renovables y la eficiencia energética se han convertido en pilares fundamentales de la transición hacia un modelo energético más limpio y resiliente. Esta transformación no solo es crucial para el medio ambiente, sino que también ofrece numerosos beneficios económicos y sociales. La rápida evolución de las tecnologías de energía limpia está redefiniendo el panorama energético global. En 2023 se añadieron 536 gigavatios de capacidad de energía renovable, lo que marcó otro año récord en el sector, crecimiento que demuestra que estas energías ya no son una promesa futura, sino una realidad presente que está desafiando los modelos de negocio tradicionales y creando nuevas oportunidades. Sin embargo, a pesar de estos avances significativos, aún enfrentamos desafíos importantes puesto que los combustibles fósiles siguen dominando el consumo energético global, representando el 79 % del total en 2022. En este contexto, la edición 20 de *Experimenta* presenta resultados de proyectos de investigación que son verdaderos aportes a la temática.

De la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales nos envían dos artículos, uno denominado «Capturar el CO₂ con materiales tan pequeños como una partícula de polvo», que tuvo como objetivo desarrollar nuevos materiales híbridos para la captura de CO₂ y su transformación en productos de mayor valor, y otro titulado «Cafeína para descontaminar combustibles», que plantea un método alternativo con cafeína para eliminar compuestos azufrados en los combustibles fósiles. De la Facultad de Ingeniería nos comparten los artículos «De las coníferas al mirtanal: procesos mejorados de una síntesis sostenible», un método que utiliza la síntesis orgánica para obtener compuestos de utilidad industrial y que además aporta a procesos ambientalmente más limpios. «De naranjas a carbonatos: un aporte a la transformación del CO₂» presenta el aceite esencial de naranja como una alternativa para la mitigación de emisiones de carbono a la atmósfera y el artículo «Fitoplancton desde el espacio: más visible que nunca» nos muestra dinámicas de crecimiento del fitoplancton en cuerpos acuáticos a través de teledetección satelital.

También de la Facultad de Ingeniería nos comparten cuatro proyectos que hicieron parte de la Alianza SÉNECA, un programa cuyos objetivos fueron discutir formas de diversificar la canasta energética y de utilizar de manera eficiente los recursos energéticos regionales. El artículo «Del sol y el viento al hidrógeno verde y metano sintético» describe cómo se llegó a diseñar la primera planta piloto en Colombia y Latinoamérica para la producción de hidrógeno verde y metano sintético. En «Combustión sin llama» nos muestran que existe un tipo de combustión en la que la llama no es visible, proceso que además presenta ventajas con respecto a la combustión convencional. «Absorber la luz en delgadas películas: la revolución de las celdas solares de perovskita» describe las celdas solares de perovskita, cuya utilización está revolucionando el mundo de la energía solar. El artículo «Alianza SÉNECA: redes vivas del ecosistema científico» nos presenta un análisis de la Alianza SÉNECA como un ecosistema científico que pretende diagnosticar, reportar y caracterizar las interacciones dentro de dicha Alianza.

Otras temáticas hacen parte de la edición 20: de la Escuela de Nutrición nos comparten el artículo «Los legados de la leche: microbiota materna y política lactante», que nos presenta un estudio de la microbiota de la leche humana, importante para la maduración del sistema digestivo del bebé. De la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales incluimos «Del río Magdalena a la Universidad: La Biblioteca de Peces de la UdeA», que documenta cómo la Colección de Ictiología de la Universidad de Antioquia ha sido fundamental en la comprensión de los cambios ante sensores ambientales y en los aportes a la conservación de ambientes acuáticos. Y finalmente, del Instituto de Educación Física, el artículo «Virtualidad Edufísica: una guía para la formación digital» que ofrece estrategias para la enseñanza de la educación física en entornos virtuales donde la mediación tecnológica limita la experiencia directa y física.

Nuestro invitado a la sección «Vidas para el conocimiento» es Jorge Andrés Calderón de la Facultad de Ingeniería, una vida disciplinada y productiva en la docencia y la investigación. El grupo de investigación en nuestra sección «Trayectorias» es GASURE, más de tres décadas dedicado a la investigación del gas natural y los recursos energéticos. Y como siempre, el libro que invitamos a leer es «Cómo funciona realmente el mundo» de Vaclav Smil, el cual permite al lector hacerse una idea de los verdaderos retos que enfrentamos como humanidad en lo relacionado con alternativas para la generación de energías y la producción de materiales agroquímicos que hoy sustentan nuestra existencia. Al final, el refrescante cuento «Una cuestión de eficiencia energética en la vida de Juan» y las cápsulas de información que nos ofrece nuestro amigo el Alkimista.

Revista Experimenta

Publicación de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia
ISSN 2357-3503

John Jairo Arboleda Céspedes
Rector

Claudia Marcela Vélez
Vicerrectora de Investigación

Carmenza Uribe Bedoya
Directora

Laura Ospina Montoya
Editora

Comité editorial

Carmenza Uribe Bedoya
Bernardo Bustamante Cardona
Luz Marina Restrepo Múnera
Sara Cristina Vieira Agudelo
Mario Víctor Vázquez Ceballos
Gloria Valencia Bustamante
Luz Adriana Ruiz Marín

Producción y diseño

Dirección de Comunicaciones
Vicerrectoría de Investigación
Universidad de Antioquia

Corrección de texto

Jens Gärtner Gutiérrez

Ilustraciones

Samuel Castaño

Infografías

Felipe Uribe Morales

Fotografía

Cortesía de los grupos de investigación y autores
Alejandra Uribe Fernández
José Luis Londoño López

La revista Experimenta es una publicación de la Universidad de Antioquia que tiene como objetivo la divulgación de la actividad científica desarrollada en la Institución. Los artículos aquí publicados tienen fines educativos y divulgativos; por tanto, el contenido de esta publicación podrá ser utilizado únicamente con fines académicos y educativos, no comerciales, de acuerdo con la norma de propiedad intelectual.

Universidad de Antioquia

Vicerrectoría de Investigación
Recepción de correspondencia: Calle 70 N.º 52-51
Teléfono (604) 2195190
revistaexperimenta@udea.edu.co
www.udea.edu.co/experimenta
Apartado Aéreo 1226
Medellín, Colombia

2025

Con teni do

Edición
20



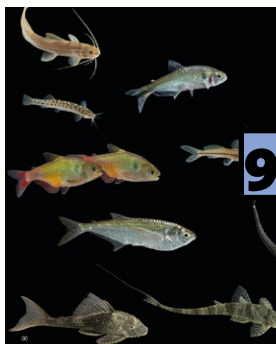
Combustión
sin llama

- 7** Fitoplancton desde el espacio: más visible que nunca
- 15** Combustión sin llama
- 21** Capturar el CO₂ con materiales tan pequeños como una partícula de polvo
- 29** Jorge Andrés Calderón Gutiérrez: Observación convertida en innovación
- 37** De naranjas a carbonatos: un aporte a la transformación del CO₂
- 43** Absorber la luz en delgadas películas: la revolución de las celdas solares de perovskita
- 49** GASURE: Investigación para la respuesta a las necesidades sociales y productiva
- 59** Del sol y el viento al hidrógeno verde y metano sintético
- 65** De las coníferas al mirtanal: procesos mejorados de una síntesis sostenible
- 69** Cafeína para descontaminar combustibles
- 73** Alianza SÉNECA: redes vivas del ecosistema científico
- 79** «Virtualidad Edufísica»: una guía para la formación digital
- 83** Los legados de la leche: microbiota materna y política lactante
- 91** Del río Magdalena a la Universidad: La Biblioteca de Peces de la UdeA
- 99** Cómo funciona realmente el mundo, de Vaclav Smil
- 103** Una cuestión de eficiencia energética en la vida de Juan
- 106** El Alkimista



28

**Jorge Andrés
Calderón Gutiérrez:**
Observación
convertida en
innovación



90

**Del río Magdalena
a la Universidad:**
La Biblioteca de
Peces de la UdeA

Fitoplancton desde el espacio: más visible que nunca

Katherine Gallego Hurtado

Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental
katherine.gallego@udea.edu.co

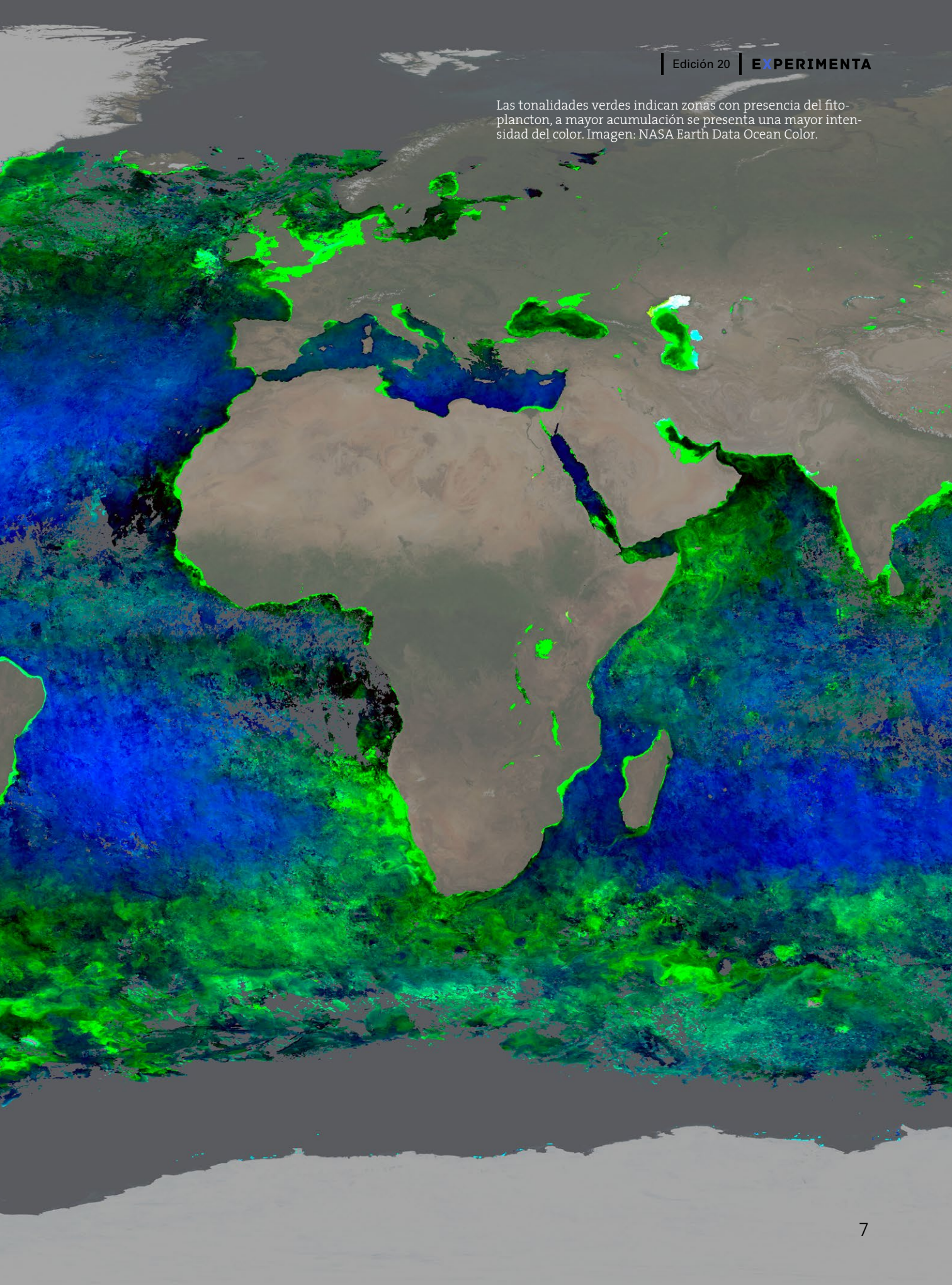
Luisa Yepes Pino

Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental
luisa.yepesp@udea.edu.co

Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental
— GAIA —

Diminutos organismos como el fitoplancton han modelado la vida en la Tierra durante millones de años. Hoy los observamos desde el espacio gracias a la tecnología satelital para entender si las floraciones de este organismo son sensibles o no a la variabilidad climática natural.

Las tonalidades verdes indican zonas con presencia del fitoplancton, a mayor acumulación se presenta una mayor intensidad del color. Imagen: NASA Earth Data Ocean Color.



«Animálculos» o «animales que flotan libremente y habitan el mar abierto» o «eflorescencia peluda»: a lo largo de la historia, exploradores y naturalistas han nombrado así a estos diminutos organismos, hoy llamados fitoplancton, que en su vasta pero casi invisible ocupación del océano y otros cuerpos de agua han supuesto tantos retos en su comprensión como en su detección a gran escala.

El fitoplancton, que incluye un grupo amplio de microorganismos acuáticos como algas y cianobacterias, tiene altísima importancia ecológica en nuestro planeta: estos pequeños pero abundantes organismos han llegado a cambiar por completo la atmósfera de la Tierra. Suministran de materia orgánica la vida acuática, y además, contribuyen a la captura de CO₂ tanto en lagos, ríos y humedales como en el océano. A través de los pigmentos presentes en su anatomía, como la clorofila-a y la ficocianina, el fitoplancton puede absorber este gas de la atmósfera en un nivel equivalente al de los bosques, liberando oxígeno en el proceso. También contribuyen al equilibrio de las redes alimentarias acuáticas, al ser la fuente primaria de alimento para una gran diversidad de organismos.

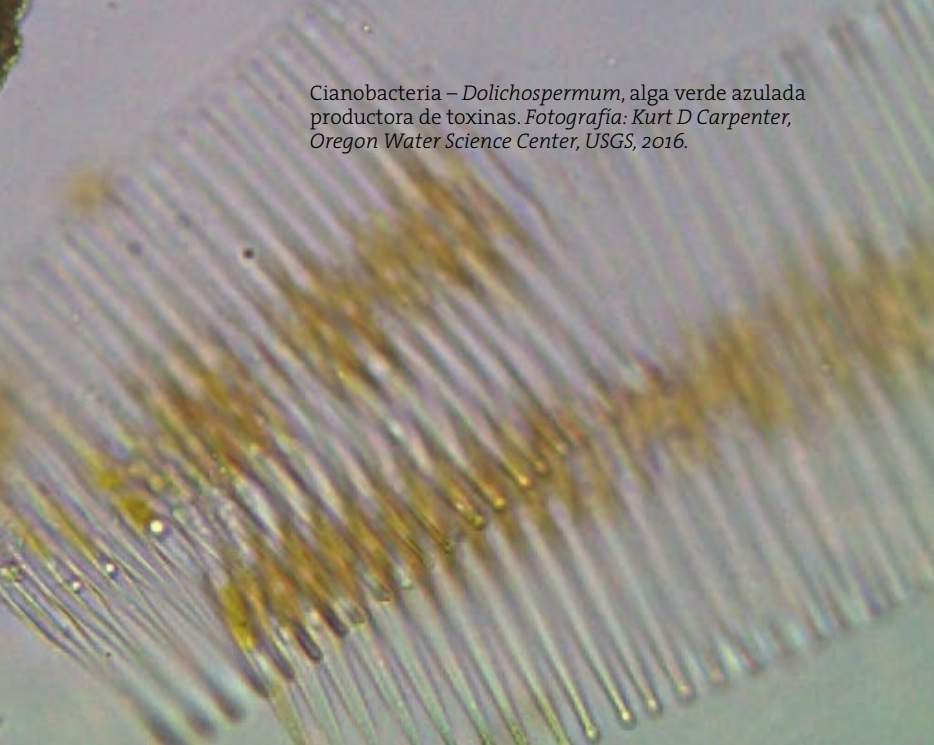


Floraciones del fitoplancton: señales de un ecosistema en desequilibrio

En los ecosistemas acuáticos, el fitoplancton también puede tener un impacto negativo. Imagina un escenario en que el fitoplancton se encuentra en aguas afectadas por frecuentes eventos extremos como el aumento de lluvias o sequías prolongadas, asociadas a fenómenos climáticos naturales como El Niño y La Niña¹. Por un lado, las lluvias intensas arrastran nutrientes como nitrógeno y fósforo desde tierras agrícolas y urbanas hacia cuerpos de agua —como lagos, ríos, humedales— y zonas costeras. Por otro lado, en periodos de sequía, la temperatura aumenta y las aguas se tornan más cálidas. A su vez, el flujo de agua disminuye y concentra estos nutrientes. En ambos casos, se pueden crear condiciones que impulsan el crecimiento descontrolado de fitoplancton en cortos periodos de tiempo, dando lugar a un fenómeno conocido como floraciones de fitoplancton.

Este fenómeno tiene muchas implicaciones para los ecosistemas, porque disminuye el ingreso de la luz solar, genera cambios de sabor y olor del agua y puede alterar su pH. Adicionalmente, dentro de los efectos más importantes se encuentra que varias de las especies de fitoplancton asociadas a este fenómeno producen toxinas que pueden afectar la salud animal y humana.

1. El Niño y La Niña son fases opuestas del fenómeno climático natural El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), que ocurre de manera cíclica y afecta el clima global al modificar los patrones de temperatura y circulación atmosférica en el océano Pacífico. El Niño se caracteriza por un calentamiento anómalo del Pacífico ecuatorial, lo que provoca sequías en la zona andina de Colombia. La Niña, en contraste, enfría estas aguas y genera efectos opuestos, lo que intensifica las precipitaciones.



Por esta razón, monitorear el fitoplancton es de suma importancia para la gestión integral del agua. Sin embargo, este fenómeno es difícil de estudiar a gran escala, especialmente si se necesita abarcar grandes extensiones de agua, pues implica altos costos de recolección y procesamiento de las muestras, así como la necesidad de personal experto en su identificación. Por esto, se han buscado otras alternativas de monitoreo que superen estas limitaciones y, además, permitan responder preguntas como *¿cuál es su distribución y qué dispara su crecimiento?*, *¿cuál es la relación de estas floraciones con los fenómenos climáticos naturales de gran escala como El Niño y La Niña?*

Fitoplancton, desde un nuevo punto de vista

La teledetección satelital es una técnica que permite a los investigadores superar ciertas limitaciones espaciales, temporales y económicas de los métodos de monitoreo de campo. Estos últimos implican la toma de muestras puntuales utilizando técnicas de fluorometría y microscopía in situ que pueden resultar complejas y requerir de personal experto. En contraste, la teledetección permite estudiar y comprender las respuestas de las floraciones a la variabilidad climática natural y su impacto sobre los ecosistemas al permitir abarcar todo un cuerpo de agua con una frecuencia aceptable ($\pm 5 - 10$ días), algo impensable desde los monitores de campo. Esta herramienta consiste en captar información de la superficie terrestre desde sensores ubicados en satélites que orbitan alrededor de la Tierra. Los sensores satelitales detectan la intensidad de los pigmentos del fitoplancton, que ayudan a identificar su abundancia, frecuencia y distribución espacial.

¿Cómo funciona este proceso? Partimos de que todas las cosas en la Tierra absorben y reflejan la radiación solar. La medida y la forma en que estos procesos ocurren dependen de la interacción entre las superficies y la luz. Así como nuestra huella dactilar es un atributo de identificación individual, en cada superficie terrestre que interactúa con la luz se revela una huella espectral distintiva. Los satélites pueden capturar imágenes que detectan la huella de los pigmentos presentes en el fitoplancton, principalmente la clorofila-a, lo que nos permite identificar los cambios en el agua.

Para lograr esto, primero se recopilan y procesan las imágenes satelitales y se elimina el ruido de otros componentes como la vegetación, la urbanización y los efectos de absorción y dispersión de la luz en la atmósfera. Posteriormente, se aplican modelos matemáticos que permiten traducir las imágenes satelitales en valores cuantificables de clorofila mediante el análisis de la huella espectral; las variaciones de este pigmento nos hablan de los patrones de comportamiento de estos microorganismos en el agua, a partir de los cuáles podemos estudiar su asociación con otros factores.

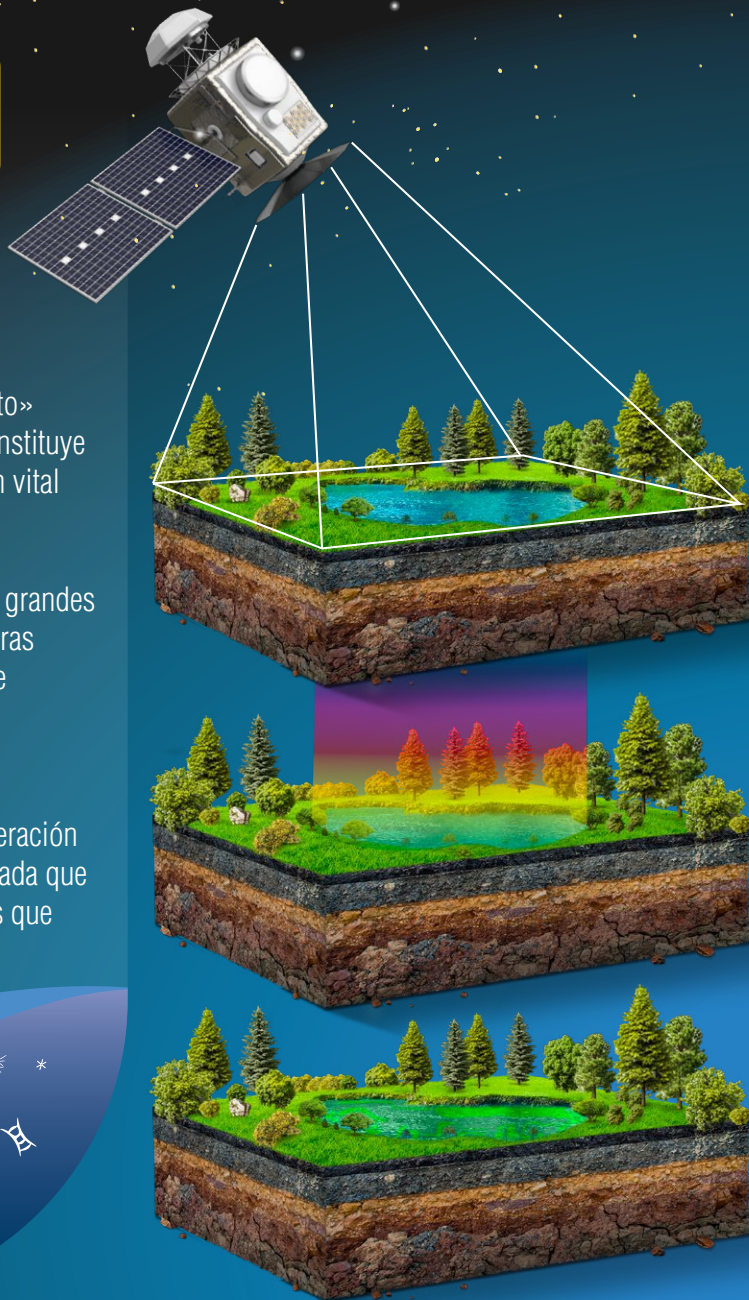
FITOPLANCTON DESDE EL ESPACIO:

FLORACIONES DE UN ORGANISMO MINÚSCULO, PERO ABUNDANTE

El fitoplancton, cuyo nombre deriva del griego «phyto» (planta) y «plankton» (vagar o andar a la deriva), constituye un grupo diverso de microorganismos acuáticos con vital importancia ecológica.

Mediante la fotosíntesis, estos organismos capturan grandes cantidades de dióxido de carbono atmosférico mientras producen aproximadamente el 50 % del oxígeno que respiramos. Además, es fundamental en las cadenas alimentarias de ecosistemas acuáticos.

Su monitoreo es muy importante, pues cualquier alteración en su dinámica puede desencadenar efectos en cascada que modifican el equilibrio ecológico con consecuencias que podrían alcanzar escalas planetarias.

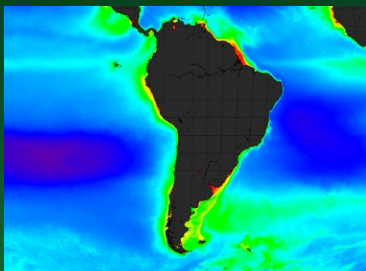


UNA FLORACIÓN no es un organismo, sino un fenómeno de crecimiento acelerado del fitoplancton que lo hace visible a simple vista, cubriendo grandes extensiones con altas concentraciones de biomasa.



LOS IMPACTOS NEGATIVOS DE UN CRECIMIENTO EXCESIVO

El crecimiento desmedido del fitoplancton altera los ecosistemas acuáticos al generar fluctuaciones en los niveles de oxígeno, acumulación excesiva de materia orgánica, modificación del pH y potencial liberación de toxinas. Este fenómeno resulta de interacciones complejas entre múltiples factores, como el exceso de nutrientes (eutrofización), el aumento de temperatura y alteraciones en los patrones de lluvia.



El acceso a imágenes satelitales ha impulsado el estudio de las floraciones de fitoplancton, particularmente en regiones del Sur Global. Plataformas de acceso libre como Sentinel y Landsat, junto con herramientas gratuitas como Google Earth Engine y QGIS, facilitan el monitoreo remoto de estos ecosistemas.



Las floraciones de fitoplancton pueden ser lo suficientemente extensas como para ser vistas desde el espacio. En las imágenes satelitales pueden aparecer como remolinos de diferentes colores entre rojos y verdes dependiendo de los pigmentos que posea el fitoplancton dominante.

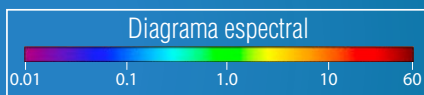


SATÉLITES COMO SENTINEL-2

capturan imágenes multispectrales de resolución media, permitiendo el seguimiento del fitoplancton en cuerpos de agua.

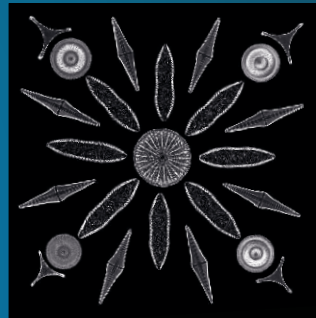
Estos satélites también han facilitado el monitoreo de cultivos y bosques, la detección y seguimiento de desastres naturales, y el análisis de los efectos del cambio climático.

Por otro lado, la resolución temporal es la frecuencia a la que pasa un satélite sobre una misma área. La resolución espectral es la capacidad del satélite de diferenciar variaciones en el espectro algo así como «tonalidades de color».

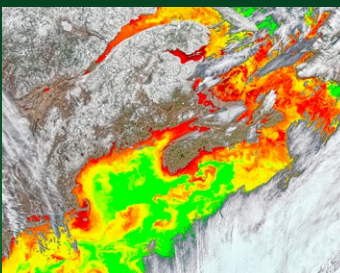


LA CLOROFILA EN EL AGUA

cambia la forma en que se refleja y absorbe la luz solar. Esta característica óptica permite a los científicos determinar cuánto fitoplancton hay, cuándo aparece y cómo se distribuye en los sistemas acuáticos a través de sensores satelitales ubicados en la órbita terrestre baja.



Composición radial de una vista microscópica de diatomeas, el tipo más común de fitoplancton.



Esta imagen del Golfo de Maine fue capturada por el satélite PACE y procesada por el equipo de la NASA el 08 de abril de 2024

Estos remolinos de colores son capturados por los satélites y son usados por los investigadores para estimar la concentración de estos organismos en el agua a través de modelos que construyen “mapas de color”. Las zonas donde las concentraciones de clorofila son altas, es decir donde crece mucho fitoplancton las podemos representar en rojo y donde son bajas en verdes. Cuantificar nos permite identificar variaciones del fenómeno y determinar el estado del ecosistema.



Cuando una floración de fitoplancton aparece puede llegar a observarse densas capas de color verde intenso en la superficie del agua que generalmente está acompañada de olores desagradables. Estas capas evitan el ingreso de luz afectando múltiples procesos como la misma fotosíntesis y la orientación de los peces en el agua.



El fitoplancton está conformado por diferentes tipos de organismos microscópicos que poseen diferentes formas, tamaños y colores. Esta diversidad también se asocia a su capacidad de adaptarse a diferentes ecosistemas. Por ejemplo algunos prefieren el agua salada, mientras que otros habitan las aguas dulces como lagos y ríos.



El fitoplancton: un indicador sensible a los fenómenos climáticos naturales

En el Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, estamos explorando la relación entre la variabilidad climática natural y la frecuencia e intensidad de las floraciones de fitoplancton en un embalse antioqueño. Estas variaciones hidrometeorológicas las medimos entre las temporadas de lluvia y sequía de la región —variación estacional— y entre las condiciones cálidas de El Niño y las condiciones frías de la Niña —variación interanual—.

Nos interesó identificar esta relación porque, debido a su ubicación en la zona tropical del planeta, Colombia presenta variaciones entre las temporadas de lluvias y sequías y entre el El Niño y La Niña que regulan múltiples procesos biológicos como la productividad de cultivos o la migración de especies. Sin embargo, en cuanto al fitoplancton, estas relaciones aún no son muy claras.

Nuestro estudio abarcó un periodo de cuatro años, desde 2020 a 2023, durante los cuales recopilamos mensualmente imágenes satelitales de Sentinel-2 en la zona del embalse a través de la Agencia Espacial Europea (ESA)². Este satélite pasa cada cinco días por el mismo embalse, y captura fotografías con una extensión de 290 km² con una resolución espacial en la que 1 pixel equivale a 100 m².

Al estudiar esta relación encontramos que la frecuencia y la distribución de las floraciones de fitoplancton no estaba directamente asociada a la estacionalidad regional, es decir, a las temporadas de lluvia y sequía que suceden en un año. Sin embargo, sí se encontró una relación entre los patrones de ocurrencia e intensidad de las floraciones y la presencia de condiciones de El Niño y La Niña durante este periodo. Así, durante El Niño, cuando se presentan anomalías como las disminución de las lluvias y el aumento temperatura, entre otros factores, se observó un aumento en la ocurrencia e intensidad de las floraciones. Por el contrario, durante La Niña estas disminuían considerablemente. Esto nos permitió identificar una relación de ocurrencia entre estos fenómenos que podría ayudarnos a establecer un sistema temprano de gestión para disminuir el impacto de eventos de floración de fitoplancton en el ecosistema del embalse. Un paso siguiente será recopilar datos para determinar si esta relación se mantiene entre varios periodos de El Niño y La Niña y si su influencia es indirecta, es decir, si estas condiciones afectan otros factores como el caudal o el ingreso de nutrientes.

Florecimiento de fitoplancton en diferentes tonalidades azules en el oeste de Islandia el 24 de junio de 2010 usando el satélite Aqua.
Fotografía: NASA Goddard.

2. Ver <https://dataspace.copernicus.eu/>

Una nueva era para la gestión y la conservación

En Colombia, se tiene reporte de florecimientos de fitoplancton en el Embalse el Guájaro en Barranquilla y los Embalses Peñol-Guatapé, La Fe, Riogrande y Porce II en Antioquia, que han sido estudiados a través de monitoreo de campo. Sin embargo, en la actualidad no tenemos políticas públicas de regulación y monitoreo de las floraciones de fitoplancton en estos sistemas, y los avances actuales sobre la caracterización y monitoreo de este fenómeno se deben a las investigaciones realizadas por diferentes universidades en convenio con entidades privadas.

El monitoreo del fitoplancton por teledetección satelital no solo es una opción, sino una necesidad para consolidar un sistema de alerta temprana de las floraciones de fitoplancton que nos permita predecir tendencias en su comportamiento y tomar decisiones para la gestión integral del agua que se encamine a la conservación y el uso sostenible de los ecosistemas acuáticos en el país.

Algunas iniciativas globales que integran la teledetección satelital para monitorear y analizar el fitoplancton son, por ejemplo:

AlgaeMap, una plataforma que busca ser un sistema de monitoreo de algas nocivas en lagos y embalses de Latinoamérica; y el programa Ocean Color de la NASA que lidera las investigaciones oceanográficas de fitoplancton a nivel mundial, con el uso de datos de diversos satélites y el estudio del ciclo de agua de la cuenca amazónica. Estos ejemplos nos muestran el abanico de posibilidades que la teledetección satelital tiene para dar respuesta a preguntas complejas del mundo microscópico a escala macroscópica, en especial para Colombia, uno de los países con mayor diversidad y riqueza de ecosistemas de aguas dulce. ✕



En el verano de 2018, el río Caloosahatchee en Florida presentó grandes florecimientos de fitoplancton tóxico, específicamente cianobacterias, por la liberación de aguas contaminadas. Esto generó una pérdida de 100 toneladas de peces, aproximadamente. *Fotografía: John Moran, Florida Times-Union.*

Este trabajo está enmarcado en la línea de investigación y gestión integral del recurso hídrico liderada por el grupo GAIA dentro del Convenio BIO, desarrollado por la UdeA y EPM. Autores asociados a la investigación están, adicionalmente, María Carolina García Chaves, Fabio de Jesús Vélez Macías, Juan Pablo Niño García, Julie Andrea Arteaga Carrera, Francisco José Molina Pérez.

Combustión sin llama

Camilo Echeverri-Urbe

Ingeniero mecánico y magíster en Ingeniería
camilo.echeverriu@udea.edu.co

Andrés A. Amell Arrieta

Ingeniero mecánico y magíster en Economía
de La Energía y Los Recursos Naturales
andres.amell@udea.edu.co

Durante un experimento en los años 80, un ingeniero alemán descubrió que el combustible se quema completamente sin mostrar llama alguna. Los sensores de monóxido de carbono marcaban menos de 1 parte por millón, algo inusual pero prometedor. En un horno desarrollado por investigadores de la UdeA, se ahorró el consumo energético hasta en un 30 % y se minimizaron las emisiones contaminantes.

Figure 1 is a bar chart showing the percentage of total sample for each age group. The y-axis is labeled 'PERCENTAGE OF TOTAL SAMPLE' and ranges from 0 to 100. The x-axis is labeled 'AGE GROUP' and has categories: 18-24, 25-34, 35-44, 45-54, 55-64, 65-74, 75-84, 85-94, and 95-104. The bars are red with white diagonal stripes. The percentages are approximately: 18-24: 15%, 25-34: 20%, 35-44: 25%, 45-54: 30%, 55-64: 35%, 65-74: 40%, 75-84: 45%, 85-94: 50%, 95-104: 55%.



A

Н

1.

C

 $\left\{ \left\{ \right. \right.$

48

15

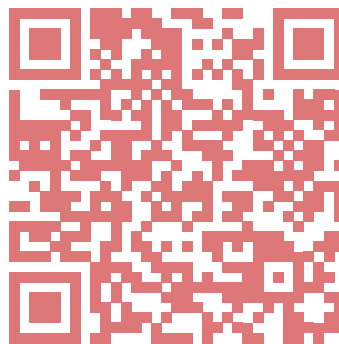
Una llama es una de las expresiones físicas de la materia en combustión, pero no la única, pues existe una forma de combustión en la que se libera calor sin una llama visible. Para que ocurra esta combustión, se requiere de tres elementos: combustible, aire u oxígeno y una fuente de calor (chispa). Esto es conocido como el triángulo del fuego; cuando falta alguno de estos elementos no se da la combustión. Sin embargo, existe un fenómeno conocido como combustión sin llama: no hay presencia del fuego como comúnmente lo conocemos.

En el Grupo de Ciencia y Tecnologías del Gas y Uso Racional de la Energía —GASURE—, hemos logrado encender un combustible sin que genere llama, proceso que además hemos aplicado en una empresa dedicada a la transformación de materiales en varios sectores industriales como los de metalmecánica, esmaltes cerámicos, construcción y agroindustria.

La combustión sin llama fue descubierta a finales de los años ochenta por la empresa WS Wärmeprozess-technik GmbH de Alemania, cuando Joachim Alfred Wüning realizaba un experimento en una cámara de combustión a alta temperatura, del orden de los 1000 °C, y suministrando el aire de combustión a 650 °C. En el experimento no se pudo ver ninguna llama y no se detectó ninguna señal de la presencia de llama utilizando sensores ultravioleta (UV) para la detección de llama. A pesar de ello, el combustible se quemó por completo y el contenido de monóxido de carbono (CO) en la chimenea del horno era inferior a 1 parte por millón¹. En el experimento las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) fueron cercanas a cero; lo que al principio se pensó que era un mal funcionamiento de los analizadores de gases luego resultó ser un nuevo tipo de combustión: la combustión sin llama.

Si bien en la literatura se encuentra que, bajo ciertas condiciones de operación, en la combustión del hidrógeno no se ve una llama, la combustión sin llama es un fenómeno diferente, presente en todos los combustibles, desde los sólidos como el carbón hasta los líquidos como el diésel y gaseosos como el gas natural o el mismo hidrógeno.

¹ En este contexto, partes por millón es una medida de la concentración de un gas en una mezcla de gases.



Escanea el QR y observa los procesos de combustión en un horno convencional y un horno de combustión sin llama.

La llama desaparece

Este fenómeno de combustión es posible gracias a que se cumplen dos condiciones: la primera es que la temperatura interna de la cámara de combustión debe estar por encima de la temperatura de autoignición del combustible, es decir, a una temperatura por encima de la cual una mezcla de comburente (normalmente aire) y combustible que se encuentre dentro del rango de inflamabilidad se encienda sin la necesidad de utilizar una fuente externa como una chispa. La segunda condición es que dentro de la cámara de combustión los gases tengan grandes corrientes de recirculación que permita que una parte de los gases de la combustión —normalmente dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂)— se devuelvan a la zona del quemador, que descarga el aire y el combustible a la cámara. De esta manera, estos tres elementos (combustible, aire y productos de combustión) se mezclan hasta que la concentración de O₂ se

disminuye por debajo del 8 %. Bajo estas dos condiciones, la llama desaparece, pero aún sigue liberándose calor, es decir, existen reacciones químicas de combustión.

Menos emisiones, mayor eficiencia: las ventajas de la combustión sin llama

■ Hay **mayor eficiencia energética** porque, al mejorar la transferencia de calor al producto que se quiere calentar, se disminuye el consumo de combustible.

■ Es **más eficiente** debido a que se utiliza mejor la energía. Se obtiene más producto en menos tiempo, es decir, se aumenta la productividad del proceso.

■ Las **temperaturas son uniformes** dentro de la cámara de combustión (en una combustión llama convencional la mayor temperatura se encuentra donde está la llama), debido a la recirculación de los gases al interior del horno.

■ El **calentamiento del producto ocurre más rápido** debido a que las temperaturas dentro del horno son uniformes.

■ **Produce menos emisiones contaminantes** y garantizan una mayor facilidad para la reducción de gases de efecto invernadero por las bajas emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO).

■ Es un **proceso con mayor flexibilidad, complementariedad e intercambiabilidad** para el uso óptimo de combustibles de composición química diferente, con lo que se facilita la complementariedad entre el gas natural y los combustibles gaseosos de origen renovable: hidrógeno, biometano, gas natural sintético y gas de síntesis.

El grupo GASURE y la combustión sin llama

Desde este descubrimiento se han realizado diferentes desarrollos tecnológicos a nivel mundial a los que hemos contribuido desde el grupo GASURE cuando se concedió la patente de un horno de combustión sin llama de 40 kW en el año 2013 y cuando en el año 2021 obtuvimos una patente más para un sistema de combustión sin llama que puede operar con combustible gaseoso, sólido, líquido y mezclas de sólido-gas o líquido-gas. Estos desarrollos fueron fundamentales en la posibilidad de usar esta tecnología en un proceso

industrial. Para ello, en conjunto con la empresa SUMICOL del grupo CORONA, se logró desarrollar un sistema de combustión sin llama para el secado de arcillas en un secadero rotativo, un equipo utilizado para secar materiales mediante la rotación de un tambor largo y cilíndrico. El reto de este desarrollo fue escalar la tecnología que operaba a 40 kW a 400 kW para lo cual fue fundamental aplicar criterios de escalado y simulaciones numéricas mediante *Dinámica de Fluidos Computacional* (CFD, por sus siglas en inglés), para posteriormente aplicar ingeniería de detalle en la fabricación del prototipo.

Para evaluar el desempeño de la tecnología de la combustión sin llama y determinar si ésta era más eficiente en comparación con la combustión convencional con la que se hacía este proceso en SUMICOL, se implementó una metodología para establecer la línea de base del proceso, es decir, realizar mediciones de temperatura y gases de combustión, consumo de combustible, producción, entre otros, de la operación del secadero durante varios días y, así, determinar la eficiencia térmica del secadero y el consumo específico, siendo este último como la cantidad de energía necesaria para producir 1 kilogramo (o unidad de peso que se maneje en el proceso) de producto.

Diseño y evaluación experimental en SUMICOL

Para el desarrollo del sistema de combustión sin llama fue necesario, como se mencionó antes, el uso de CFD para evaluar diferentes geometrías y condiciones de operación aplicando criterios de escalado y diseño con el fin de seleccionar la opción más óptima en cuanto a estabilidad y la mínima cantidad de emisiones de gases nocivos al ambiente. Posteriormente, se realizaron pruebas piloto en lo que llamamos pre-prototipo, es decir, un prototipo de bajo costo que ayuda a validar las simulaciones numéricas y que se usa en el proceso de SUMICOL con el fin de detectar posibles condiciones inadecuadas para corregir en el diseño final.

Los resultados de las pruebas en la planta de SUMICOL con el pre-prototipo fueron muy alentadores, puesto que la potencia a la cual se probó el sistema no era la nominal o, dicho en otras palabras, no era la que se usaba en el secadero y aún así los indicadores como la eficiencia térmica y el consumo es-

pecífico eran muy similares a la condición de operación normal del secadero. Por lo tanto, se procedió al diseño de detalle del prototipo final.

El prototipo final que opera con régimen de combustión sin llama escalado a una potencia de 400 kW fue instalado y acoplado exitosamente en el secadero rotativo sin presentar ningún problema en la operación y demostrando que era más eficiente que la tecnología convencional con llama, ya que se demostró que con menor potencia térmica era posible aumentar la producción cumpliendo todos los parámetros de calidad del producto. En otras palabras, se produjo más producto con menos consumo de gas natural y sin generar ningún problema en la operación, lo cual significa un ahorro del consumo de combustible hasta el 30 % para la empresa.

El Grupo GASURE, a través de su trabajo conjunto con la empresa SUMICOL, contribuye con este proyecto de innovación a la responsabilidad ambiental con aportes a la transición energética a través del uso de tecnologías de combustión avanzada como la combustión sin llama. ✕

Planta de SUMICOL.

Fotografía: Cortesía de SUMICOL.



Glosario

Comburente: Sustancia que al combinarse con un combustible favorece o permite que se produzca una combustión. Sin el comburente, no sería posible la combustión.

Temperatura de autoignición: La temperatura de autoignición es la temperatura mínima a la cual un combustible se encenderá espontáneamente sin necesidad de una fuente externa de ignición, como una llama o chispa. Este fenómeno ocurre cuando el combustible alcanza una energía térmica suficiente para iniciar la combustión debido a la acumulación de calor en su interior.

Este texto se deriva del proyecto Ajuste, escalado y evaluación en condiciones de procesos productivos industriales de sistemas de combustión avanzados de alta eficiencia energética y bajas emisiones. **Convocatoria:** 792-2017 2ª CONVOCATORIA ECOSISTEMA CIENTÍFICO PARA LA FINANCIACIÓN DE PROGRAMAS DE I+D+i.

Nombre del programa: Alianza para la sostenibilidad energética de los sectores industrial y de transporte colombiano mediante el aprovechamiento de recursos renovables regionales - SÉNECA. **Equipo de trabajo:** Universidad de Antioquia - GASURE: Andrés A. Amell Arrieta, Yonatan Cadavid Sánchez, Camilo Echeverri-Urbe, Yefferson López Zuluaga, Julián Esteban Obando Arbeláez, Andrés F. Colorado, Cristian Camilo Mejía Botero, Juan Esteban Ferrer Ruiz, Alejandro Restrepo Román. SUMICOL: Juan Felipe Gil Quintero, Juan David Rivas Medina, Ana María Muñoz Arango, Federico Moncada, José Manuel Gómez, Pedro Gómez.

Capturar el CO_2 con materiales tan pequeños como una partícula de polvo

Cecilia Manrique Hernández

Química y doctora en Ciencias Químicas
alba.manrique@udea.edu.co

Laura Cristina Urán Castaño

Ingeniería Química y doctora en Ciencias Químicas
laura.uran@udea.edu.co

Forma microscópica del MOF en forma de rosa, rodeado de la zeolita; visualizados por microscopía electrónica de barrido. *Fotografía: cortesía del grupo de investigación.*

Imagina una diminuta red capaz de atrapar uno de los gases que altera nuestro clima. Las tecnologías de captura de dióxido de carbono se valen del estudio de materiales híbridos que logran adsorber —distinto a absorber¹— y retener moléculas de forma específica.

¹ «Dicho de un cuerpo: Atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otro cuerpo». Real Academia Española. (2023). Diccionario de la lengua española. Tomado el 17 de marzo de 2025 de <https://dle.rae.es>



n gas presente en nuestras exhalaciones, en los volcanes, en la combustión de la leña, en el exhosto de los carros y camiones y, en general, en la quema de combustibles fósiles se encuentra en un tremendo desequilibrio. El dióxido de carbono (CO₂), ese gas esencial para la vida en la Tierra, ha traído también uno de los mayores desafíos planetarios al alcanzar concentraciones ahora nocivas para la salud y críticas para las dinámicas climáticas globales. Los impactos más conocidos del exceso de este gas en la atmósfera son el aumento global de la temperatura, la acidificación de los océanos —con consecuencias directas como la muerte de los corales y la puesta en riesgo de la vida marina en general— y los eventos de precipitación y sequías extremas. El planeta captura el dióxido de carbono de forma natural de muchas formas: a través del océano por procesos de absorción y de las algas y los bosques por fotosíntesis. Esto tiene que ver con el ciclo natural del carbono en el que algunos procesos geológicos, biológicos o antrópicos producen CO₂; otros, como las dinámicas hidroclimáticas, lo circulan, y otros lo capturan para completar el ciclo.

Sin embargo, como lo ha constatado el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la actividad humana desde las épocas preindustriales, hacia el año 1750, ha roto el delicado equilibrio del efecto invernadero del que hace parte el CO₂ (al igual que otros gases), cuyo exceso —150 % más alto hoy que en el siglo XVIII— se ha convertido en uno de los principales problemas mundiales de la ingeniería y la política ambiental global.

La captura segura del CO₂

Uno de los mayores retos frente a este desafío tiene que ver con acciones climáticas globales que disminuyan los gases de efecto invernadero para 2050 —como las planteadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU—. Estas incluyen la adopción de sistemas eléctricos renovables, vehículos sin emisiones, una agricultura neutra en emisiones y el desarrollo de tecnologías para la captura del CO₂. En este último punto es que el grupo de investigación de la Universidad de Antioquia Catalizadores y Adsorbentes trabaja para proponer alternativas que contribuyan a la mitigación del cambio climático.

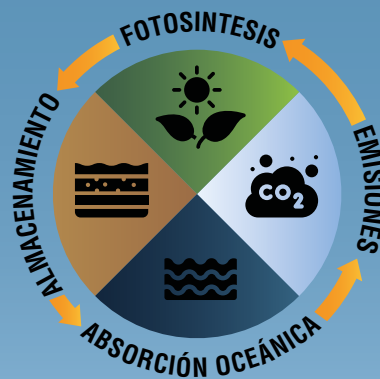
En el mundo existen acciones para capturar el CO₂ producido por las grandes industrias y almacenarlo en formaciones geológicas, pero, aunque ha mostrado ser una técnica efectiva, presenta riesgos, como la posible fuga del CO₂ o la contaminación de acuíferos subterráneos, lo cual podría afectar la calidad del agua potable. Por eso, una de las tareas urgentes de la ingeniería y las ciencias básicas del momento es proponer soluciones que permitan capturar este gas en sitios puntuales, y no necesariamente industriales.

Para lograrlo es importante crear tecnologías capaces de eliminarlo en lugares donde su presencia sea baja. Esto incluye su captura en fuentes móviles (como automóviles) y en las trazas presentes en el aire, lo cual es crucial tanto para el control de CO₂ en la atmósfera como para la calidad del aire en espacios confinados, como sótanos, túneles, oficinas y otros entornos cerrados. En consecuencia, la captura aérea directa parece ser un enfoque contribuyente para reducir la concentración de CO₂.

CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DEL CO₂

El ciclo del carbono implica el movimiento continuo del carbono entre la atmósfera y la Tierra, manteniendo un equilibrio natural. Sin embargo, las actividades industriales generan un exceso de CO₂ que supera la capacidad de absorción del planeta, provocando desequilibrios y contribuyendo al calentamiento global.

En la industria, el CO₂ se captura usando sustancias químicas poco amigables con el medio ambiente y que pueden generar subproductos tóxicos, contribuir a la degradación ambiental.



CICLO CO₂

EMISIONES:

Liberación de CO₂ a la atmósfera por procesos naturales y humanos.

FOTOSÍNTESIS:

Las plantas capturan CO₂ para producir oxígeno y energía.

ALMACENAMIENTO:

El carbono se guarda en océanos, suelos y combustibles fósiles.

ABSORCIÓN OCEÁNICA:

Los océanos absorben CO₂, ayudando a regular su cantidad en la atmósfera.

BOSQUES

Los árboles y plantas absorben CO₂ durante el proceso de fotosíntesis.

OCEANO

Los océanos absorben aproximadamente un cuarto del CO₂ emitido por actividades humanas, sin embargo, puede causar acidificación del agua.

ALGAS

Al igual que los árboles, las algas marinas realizan la fotosíntesis, capturando CO₂.

BALLENAS

La popó de las ballenas fertiliza el fitoplancton, que absorbe CO₂ mediante fotosíntesis. Al morir, parte de este carbono se hunde al fondo del océano, almacenándose durante siglos. Así, las ballenas contribuyen indirectamente a reducir el CO₂ en la atmósfera y a combatir el cambio climático.

Una vez capturado, el CO₂ se transporta a través de tuberías o se envía en barcos para depositarlo en antiguos yacimientos de petróleo, o en capas profundas de la tierra.

CO₂ Agua
CO_{2(g)} mezclado con agua (CO_{2(g)} hidratado)

Una posible fuga del CO₂ o la contaminación de acuíferos subterráneos, podría afectar la calidad del agua potable.

MATERIALES COMBINADOS

ZEOLITA

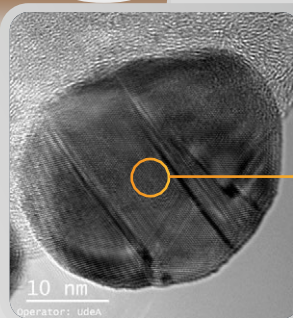
REDES METAL ORGÁNICAS

Zeolitas /redes metal orgánicas para mejorar las propiedades químicas de un material final.

MOF/ ZEOLITA

ADSORCIÓN DE CO₂ EN MATERIALES POROSOS SINTÉTICOS

Los materiales porosos son una opción muy interesante para ayudar al planeta a reducir el CO₂. Estos materiales tienen pequeños agujeros en su estructura que pueden atrapar el gas y evitar que se libere a la atmósfera.



CONCLUSION



El uso de materiales sólidos porosos, como las redes metal-orgánicas y las zeolitas, es una opción interesante para capturar CO₂ porque son mucho más amigables con el medio ambiente que los productos químicos que se usan hoy en día. Además, estos materiales porosos se pueden reutilizar varias veces para capturar el gas sin perder su desempeño, lo que significa que generan menos desechos. Esto contribuiría a combatir el cambio climático de manera más eficiente.

Hacia la síntesis de materiales porosos híbridos para la captura de CO₂

Entre los numerosos estudios en curso, se están investigando sólidos porosos —pensemos en una piedra pómez o en una esponja de la cocina— que tienen canales internos que permiten la captura y almacenamiento de CO₂.

La Universidad de Antioquia, en su tarea de enfrentar el cambio climático a través de proyectos de creación, investigación e innovación, ha vinculado estos esfuerzos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, especialmente con el objetivo 13: «Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos». En este sentido, el grupo de investigación se ha dedicado a desarrollar nuevos materiales sólidos para la captura de CO₂ y su transformación en productos de mayor valor.

El conjunto de materiales que se han estudiado están basados en materiales sólidos adsorbentes —como los que tienen poros capaces de capturar diferentes tipos de sustancias gaseosas o líquidas—, específicamente en materiales de tipo redes metal-orgánicas, que están conformadas tanto por metales como el cobre, el cromo, el manganeso, el cobalto, el níquel (los más económicos) como por compuestos orgánicos. Estos materiales se han combinado con zeolitas, un tipo de material natural compuesto principalmente por silicio (Si), aluminio (Al) y sodio (Na) y presente en los depósitos volcánicos. En su forma sintética, o sea preparada en el laboratorio, nos ha permitido el estudio de sus propiedades porosas y de estabilidad térmica. La combinación de ambos materiales ha dado lugar a la obtención de un único material zeolita/red metal-orgánica, lo que ha permitido analizar su capacidad para adsorber moléculas específicas como el CO₂.

Para que los sólidos porosos sean eficaces deben ser altamente selectivos hacia el CO₂, es decir,

deben adsorber preferentemente el dióxido de carbono sobre otras moléculas presentes en el aire, como el nitrógeno o el oxígeno, y poseer estabilidad térmica para resistir altas temperaturas, como las generadas en los gases de escape de automóviles (mayores a 300 °C). Aunque los materiales de redes metal-orgánicas son selectivos hacia el CO₂, suelen ser inestables térmicamente y se descomponen a temperaturas bajas, lo que limita su aplicación. Por el contrario, las zeolitas pueden soportar temperaturas superiores a 500 °C, lo que las hace adecuadas para su aplicación a diferentes temperaturas. Combinar los materiales de redes metal-orgánicas con zeolitas podría ofrecer un material híbrido que sea selectivo hacia el CO₂ y, a su vez, capaz de resistir altas temperaturas gracias a la estabilidad térmica proporcionada por las zeolitas.

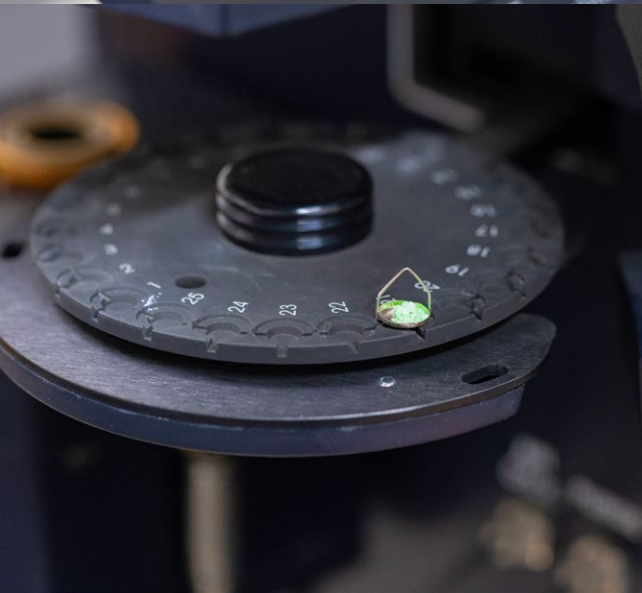
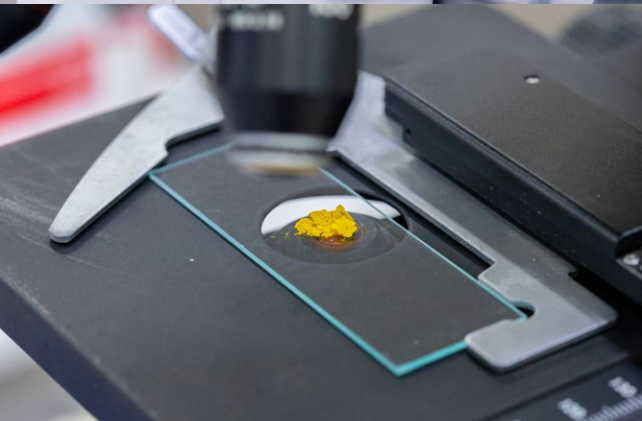
En el grupo de investigación se realizó la preparación o síntesis de las redes metal-orgá-

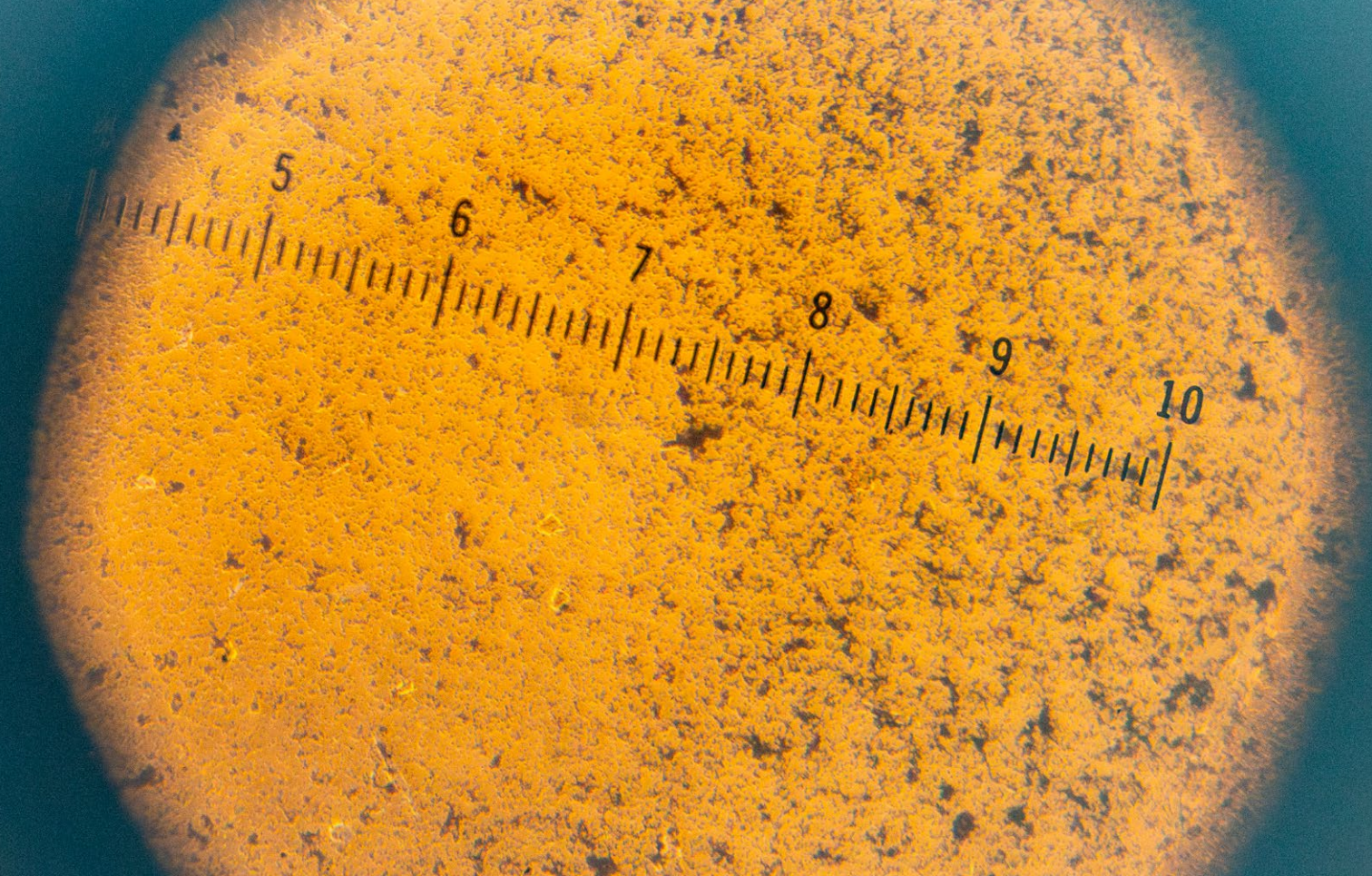
Arriba

Mezcla de reactivos en el laboratorio para formar materiales sólidos. Los reactivos se combinan para obtener materiales sólidos de diferentes colores, dependiendo del metal utilizado.
Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.

Abajo

Observación del material sólido bajo el microscopio. El material sólido se analiza en el microscopio para estudiar su tamaño y forma.
Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.





Observación del sólido bajo el microscopio. Algunas partículas del sólido son lo suficientemente grandes como para observar su forma geométrica cuadrada.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.

nicas con los metales de transición de magnesio (Mg) y níquel (Ni), y su combinación en diferentes proporciones. Este proceso se llevó a cabo a temperaturas cercanas a 125 °C con un tiempo de síntesis de entre 12 y 24 horas. Estas condiciones son destacables ya que en la literatura se reportan tiempos de síntesis mayores a 24 horas. Cuando el material de redes metal-orgánicas sin zeolita se sometió a una temperatura cercana a los 300 °C, se mantuvo íntegro en su estructura en un 60 %, mientras que cuando se combinó con la zeolita y se probó a la misma temperatura, se mantuvo en un 80 %. Esta resistencia térmica es un resultado prometedor, ya que estos materiales podrían aplicarse en procesos o ambientes donde halla altas temperaturas y condiciones agrestes, como la presencia de metales pesados o contaminantes en el agua.

¿Qué tanto CO₂ podría adsorber este material?

Los sólidos obtenidos se evaluaron en su capacidad para capturar CO₂, inicialmente a temperatura ambiente y presión atmosférica, con el propósito de determinar su habilidad para capturar las trazas que estén presentes en

el aire. Los resultados obtenidos mostraron que los sólidos capturaron cantidades de CO₂ entre 3 y 5 mmol de gas por cada gramo de sólido utilizado. Esto se traduce en aproximadamente en 132 mg para 3 mmol y 220 mg para 5 mmol de gas, lo que se considera un rendimiento aceptable desde el punto de vista científico. El éxito de este trabajo no solo radica en la eficiencia y rapidez del proceso de síntesis, sino también en la calidad y estabilidad de los sólidos obtenidos, lo que abre nuevas posibilidades para la investigación y el desarrollo de materiales novedosos con aplicaciones ambientales. Las evaluaciones preliminares de las redes metal-orgánicas y zeolitas para la

adsorción de CO₂ muestra un potencial para la captura de gases en el aire. Igualmente, los resultados de la combinación zeolita/redes metal-orgánicas indican que esta mezcla es beneficiosa para la adsorción de CO₂, pues cuenta con mayor estabilidad térmica.

Con el desarrollo de este proyecto, hemos aprendido que la combinación de zeolitas y de las redes metal-orgánicas es una estrategia prometedora para capturar CO₂ y otros contaminantes ambientales, pues ofrecen alta capacidad de adsorción y selectividad, mientras que las zeolitas aportan estabilidad térmica para condiciones extremas. La capacidad de trabajo conjunto de estos materiales permite crear compuestos que capturan eficientemente el CO₂ y mantienen su integridad a altas temperaturas, ampliando las aplicaciones potenciales.

Esta iniciativa del grupo tiene como objetivo seguir avanzando en la búsqueda de sólidos que permitan capturar una mayor cantidad de CO₂ que sea más atractiva, lo que permitiría llevarla a aplicaciones concretas para contribuir efectivamente a mitigar las emisiones de este gas. Este proyecto representa una de las múltiples estrategias que necesitamos desarrollar para lograr la reducción de emisiones que se definió en el Acuerdo de París el 12 de diciembre de 2015, durante la Conferencia de las Partes (COP21) en París, Francia. ✕

Glosario

Ácidos carboxílicos: Compuestos orgánicos que contienen el grupo funcional carboxilo (-COOH) fundamentales en procesos bioquímicos y síntesis química.

Adsorbentes: Materiales sólidos con estructura porosa que tienen la capacidad de adherir moléculas en su superficie al permitir la captura selectiva de diferentes tipos de sustancias gaseosas o líquidas.

Compuesto orgánico: Compuesto químico que contiene principalmente átomos de carbono e hidrógeno, a menudo en combinación con otros elementos como oxígeno, nitrógeno, y halógenos.

Degradación térmica: Proceso mediante el cual un material pierde sus propiedades químicas o físicas debido a la exposición a altas temperaturas, lo que puede provocar su descomposición o cambios estructurales.

Estructura microporosa: Materiales sólidos que tienen poros con diámetro menor de 2 nanómetros.

Materiales híbridos: Materiales formados por la combinación de componentes de diferentes naturalezas que proporcionan propiedades mejoradas o nuevas funcionalidades en comparación con los componentes individuales.

Metales de transición: Elementos químicos ubicados en el bloque d de la tabla periódica, caracterizados por su capacidad de formar múltiples estados de oxidación y presentar propiedades metálicas variables.

Redes metal orgánicas: Materiales sólidos porosos conformados por metales y compuestos orgánicos.

Resistencia: Capacidad de un material para soportar condiciones adversas sin sufrir deformación o daño estructural significativo.

Síntesis: Proceso realizado para crear un compuesto o material a partir de sustancias más simples mediante reacciones químicas controladas.

Zeolitas: Materiales sólidos porosos que contienen principalmente aluminio, silicio y oxígeno.

Este texto se deriva del proyecto de investigación Captura de CO₂ con adsorbentes híbridos en corrientes de gases de combustión provenientes de fuentes móviles como alternativa para mitigar el cambio climático, 2022-55551, financiado por el Comité para el Desarrollo de la Investigación -CODI. Convocatoria para proyectos de Investigación Temática 2022: Ciencia e innovación en respuesta a los desafíos asociados al cambio climático.



«Vidas para el conocimiento»

Jorge Andrés Calderón Gutiérrez

Observación convertida
en innovación

Carmenza Uribe Bedoya

Química. Directora de la revista *Experimenta*

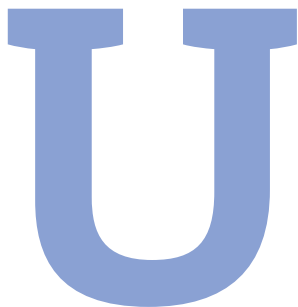
Profesora jubilada de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Antioquia

Jorge Andrés Calderón Gutiérrez.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández,

Dirección de Comunicaciones.

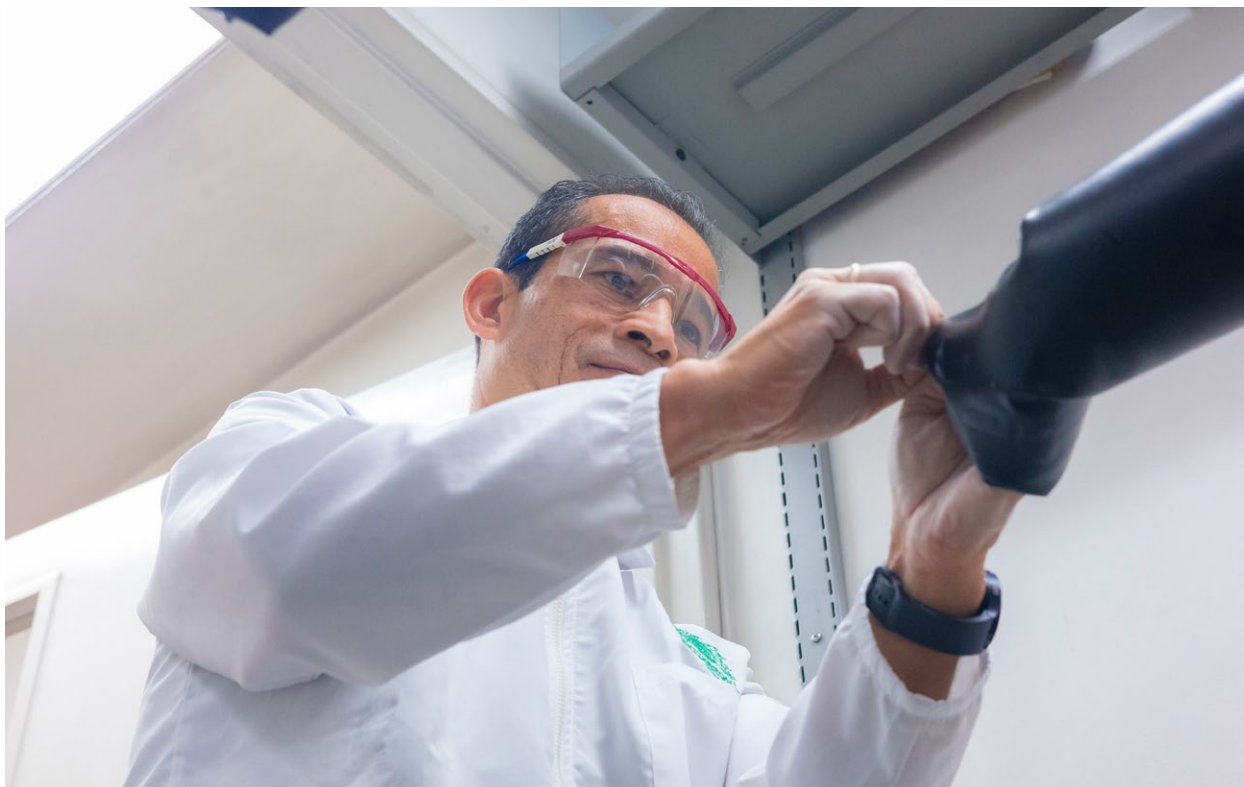


n torso de mujer está ubicado desde septiembre de 1986 en el Parque de Berrío, en el centro de Medellín. Es la conocida Gorda, un ícono de la ciudad que el escultor Fernando Botero regaló a Medellín ese mismo año. En la plazoleta central de la Universidad de Antioquia, se puede apreciar lo que constituye un identificador institucional: la escultura *El hombre creador de energía* del escultor Rodrigo Arenas Betancur, que nació en 1969, junto con la ciudad universitaria. Ambas esculturas tienen en común el material del que están elaboradas: el bronce. *La Gorda* es una escultura hueca fabricada en bronce, mientras que el monumento universitario es una combinación de bronce y concreto. Las esculturas en bronce ubicadas al aire libre están expuestas a factores medioambientales que provocan el fenómeno de la corrosión. Este hecho inspiró en 1996 al entonces ingeniero metalúrgico Jorge Andrés Calderón Gutiérrez y a su tutor, el profesor Carlos Arroyave, a diseñar un proyecto de investigación que buscó identificar y cuantificar las variables que originan el deterioro de las esculturas expuestas al aire libre.

La temática de esta investigación está centrada en uno de los atributos clave de un ingeniero: su sensibilidad para abordar la realidad como fuente de ideas para el planteamiento de preguntas que lleven a comprender los fenómenos observados, intervenirlos cuando sea posible y plantear soluciones pertinentes. Esto describe a Jorge Andrés Calderón: un investigador comprometido con la aplicación de sus conocimientos. Nacido en Itagüí, con bachillerato en un seminario de capuchinos, pregrado en Ingeniería Metalúrgica, maestría en Ciencias Químicas de la Universidad de Antioquia y doctorado en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil, Jorge Andrés ha seguido el camino propio de un investigador: sólida formación académica, óptica entrenada para visualizar objetivos de estudio y propósitos claros en lo relacionado con la solución de problemas relacionados con su área de interés. Acompañenme a conocer los pasos que siguió este ingeniero en la consolidación de una interesante y productiva carrera investigativa.

Objetivo permanente: crecimiento académico

Jorge Andrés es hijo de José Tomás, ya fallecido, a quien le aprendió el amor a la lectura, y de Blanca Lucía, un apoyo incondicional en todas las etapas de formación. Ambos fueron insistentes en la necesidad de estudiar como meta de vida. Perteneciente a una familia grande de seis hombres y cuatro mujeres, Jorge Andrés, así como sus cinco hermanos, estudió internos, con beca, en el Seminario San José de padres terciarios capuchinos, una institución masculina en el municipio de La Estrella. Y fue allí, en un ambiente, similar al de los scouts, de disciplina, deportes y horarios específicos,



Jorge Andrés Calderón Gutiérrez. Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.

donde se fue formando su mente inquieta y observadora. El gusto del estudio de la naturaleza moldeó prácticamente todo su tiempo en el Seminario. Las necesidades económicas de su familia postergaron por un año el ingreso a la Universidad, tiempo durante el que ejerció de mensajero y de zapatero, actividades que combinaba con el estudio de la guitarra. El interés por la ingeniería hizo que ingresara a la carrera de Ingeniería Metalúrgica en 1988. De su pregrado reconoce grandes maestros, e inspiradores: Carlos Arroyave, Asdrúbal Valencia, Julio Minotas, Jairo Ruiz, entre otros, con quienes pudo percibir una ingeniería metalúrgica viva y plena de posibilidades de abordaje. Al mismo tiempo que desarrollaba su carrera de pregrado trabajaba de noche en una charcutería, junto con uno de sus hermanos. Con lo que ganaba allí pagaba sus estudios, pero esta actividad iba mucho más allá de la venta y los ahorros monetarios. Este fue un lugar especial en el que los amigos del barrio iban a descansar, a escuchar música y a conversar. Allí, Jorge Andrés fue un referente para los visitantes: era un estudiante universitario, lo que generaba admiración y respeto. La práctica profesional la desarrolló en la Fundación Álvarez una empresa de refinación de metales preciosos: oro, plata y platino, asociada al Banco de La República. Su desempeño fue tan bueno que le propusieron continuar como ingeniero una vez se hubiera graduado. Así fue como su práctica profesional de seis

**El ser humano siente,
piensa, ama y vive a
través de fenómenos
que se pueden
explicar desde la
óptica electroquímica**

meses se convirtió en un trabajo como ingeniero durante tres años más, en el cargo de jefe de la fundición. Pero Jorge Andrés quería más academia, y fue así como regresó a la Universidad de Antioquia, al grupo de Corrosión, del que los profesores Asdrúbal Valencia y Carlos Arroyave han sido líderes indiscutibles. El profesor Arroyave lo recibió como estudiante de la maestría en Ciencias Químicas, y, aunque en ese momento el grupo no disponía de becas, Jorge Andrés aprovechó el ahorro que había hecho en la Fundación Álvarez para pagar sus matrículas.

Esculturas en bronce al aire libre: una realidad, una investigación

Las palabras ingeniero e ingenio están estrechamente relacionadas. El ingeniero moderno está cada vez más comprometido a ofrecer, no solo con su ingenio sino con su iniciativa y conocimientos, soluciones inteligentes y prácticas que satisfagan las necesidades de un mundo densamente poblado. El grupo de Corrosión y Protección de la Universidad de Antioquia tuvo un importante crecimiento en la década de los 90, precisamente cuando Jorge Andrés se vinculó, puesto que fue una época en la cual se dio la formación posgraduada de varios de sus integrantes, quienes, al regresar al grupo con sus títulos de doctorado, fueron creando líneas de investigación de profundas implicaciones en lo relacionado con la comprensión de los fenómenos de la corrosión atmosférica, la de metales, la ocurrida en aguas y suelos, así como las diversas formas de protección con recubrimientos anticorrosivos y de mitigación y prevención de tal deterioro. En el marco de estos estudios fue que se desarrolló el trabajo de investigación de la maestría de Jorge Andrés: un proyecto de investigación del impacto ambiental de la corrosión y el deterioro de obras de arte en la ciudad de Medellín, financiado por el Fondo Mixto de Promoción de la Cultura y las Artes de Antioquia, que incluyó tres grandes obras escultóricas en bronce: *La Gorda* de Fernando Botero, en el centro de la ciudad, y *El hombre Creador de Energía* y el *Cristo cayendo* del escultor Rodrigo Arenas Betancur, ambas en la Universidad de Antioquia, así como los bustos correspondientes a hombres y mujeres ilustres, ubicados en la Avenida La Playa, todo un homenaje a personajes que marcaron la historia de la ciudad.

En el proyecto, Jorge Andrés estudió las características medioambientales que determinan la corrosividad atmosférica, tales como el pH de las aguas lluvias y la cantidad de contaminantes

atmosféricos, en especial cloruros, sulfatos y carbonatos, variables que inciden directamente en la formación de pátinas o productos de corrosión sobre la superficie de las esculturas. Para lograr estos objetivos, los investigadores ubicaron captadores de contaminantes y de aguas lluvias en varios puntos, obtuvieron los datos, evaluaron la velocidad de corrosión y cruzaron la información con el régimen de vientos en Medellín para concluir cuáles de las esculturas estaban expuestas a mayor posibilidad de deterioro. Específicamente, las esculturas de la Avenida La Playa están afectadas por una mayor cantidad de material particulado que genera mayor afectación por la corrosión.

Una visita internacional, un cambio de rumbo académico, una línea de investigación

Al terminar el programa de Maestría, la Facultad de Ingeniería recibió la visita del doctor Oscar Rosa Matos, de la Universidad Federal de Río de Janeiro, quien estuvo dos meses en la Universidad de Antioquia dictando un curso de electroquímica aplicada al estudio de la corrosión de metales, curso al

Jorge Andrés Calderón Gutiérrez.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández,

Dirección de Comunicaciones.



que asistió Jorge Andrés. Ante el interés que demostró, el profesor Roa lo invitó a Río de Janeiro a formarse como doctor en esa área. Su paso por Brasil le otorgó una visión más amplia y profunda de los estudios de corrosión, esta vez centrados en la óptica electroquímica, especialidad del laboratorio en el que desarrolló su doctorado. Al terminar, en 2003, regresó a la Universidad de Antioquia para incorporarse como docente-investigador al grupo de Corrosión, donde dio inicio a la línea de investigación en electroquímica aplicada a la corrosión.

Una línea de investigación va mucho más allá de ser un repositorio de proyectos y una oportunidad de formación de las nuevas generaciones. Es un proyecto de saber soportado en una agenda de trabajo que inicia con una denominación general de la línea y que, con el tiempo, va adquiriendo una personalidad propia con base en las indagaciones específicas que se aborden y en la intencionalidad que los investigadores le dan a cada proyecto. La línea de electroquímica liderada por Jorge Andrés empezó enlazando la electroquímica a otros campos como la electrodisolución de metales, la electrorrefinación de metales, los materiales electroactivos y la elaboración de sensores electroquímicos que determinan pulsos de corriente por cambios en el pH que llegan a un transductor que capta las señales.

Con todo lo anterior, se ha configurado una línea interdisciplinar que reúne a ingenieros de materiales, ingenieros químicos, ingenieros eléctricos, químicos y físicos, quienes, con Jorge Andrés, el líder, a la cabeza, han desarrollado una estrategia propia de consolidación interna y de colonización de espacios de financiación. Jorge Andrés narra las dificultades que surgieron cuando después de 2010 disminuyó la posibilidad de financiación de proyectos en corrosión y la línea debió migrar a otras temáticas como la recuperación electroquímica de metales, los nanomateriales aplicados a sistemas electroquímicos y a energía. Actualmente la línea avanza en la consolidación de proyectos basados en materiales aplicados a sistemas de almacenamiento de energía, al desarrollo de baterías ion-litio y sistemas de generación de hidrógeno por electrólisis. En particular, los estudios en baterías ion-litio han cobrado interés a nivel mundial y aquí se están orientando a la síntesis de nuevos materiales activos para esta clase de baterías, así como al estudio de sus propiedades.

Jorge Andrés Calderón de ahora en adelante

Actualmente, Jorge Andrés se siente satisfecho por haber consolidado una línea de investigación, la de electroquímica, en un campo que permite aplicaciones pertinentes para la sociedad, logro obtenido no solo a través del desarrollo de los proyectos sino, sobre todo, por su formación de personal de alto nivel en esta área. Su sueño es que cada idea que se desarrolle y se trabaje, tenga impacto social y encuentre sinergias y aplicabilidad. En este punto de su vida, agradece el aporte de sus grandes inspiradores: el profesor Carlos Arroyave, por lo metódico, estructurado y disciplinado, y el profesor Oscar Rosa Matos por su seriedad y la convicción con la que forma a sus estudiantes. Como objetivos a futuro, Jorge Andrés considera importante fortalecer la parte aplicativa de todos sus proyectos, y en cuanto a objetivos personales le gustaría estudiar economía y otros idiomas, y recuperar la actividad musical a través de la guitarra. Conserva grandes amistades en Brasil. Se considera afortunado porque mientras hacía el doctorado vivió en Copacabana, la famosa playa brasilera, muy cerca de Ipanema. También guarda recuerdos emocionantes del Car-

naval de Río, en el que participó más de una vez inscribiéndose en una escuela de samba y desfilando con trajes alegóricos en el sambódromo. Así como estos, también son recuerdos importantes las noches de charcutería cuando sus amigos iban a buscar palabras de aliento, a escuchar música en un lugar acogedor y tranquilo que permitía a los asistentes olvidarse de las presiones de la cotidianidad.

En su vida personal, cuenta con el acompañamiento de su

esposa Paula Marcela y de sus hijos María Ángel, Federico y José Manuel, a quienes les dedica tiempo de calidad. Se siente orgulloso de trabajar en electroquímica porque es algo que sorprende a cualquiera de ellos, así como a personas que no conocen del tema: esa presencia ubicua de la electroquímica: el cuerpo funciona con electroquímica, el cerebro actúa por conexiones de esta clase, el ser humano siente, piensa, ama y vive a través de fenómenos que se pueden explicar desde la óptica electroquímica.

Y es así como este ingeniero investigador fusiona permanentemente lo que sabe con lo que hace, lo que investiga con lo que comunica. Un líder que ha desarrollado su proyecto de saber, el cual ha transitado las etapas que han producido su fortalecimiento: la definición de problemas, la delimitación metodológica de los mismos y la construcción de autonomía e identidad en sus proyectos. Todo un modelo de trabajo para las generaciones actuales y las futuras. ✕



Jorge Andrés Calderón Gutiérrez.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández,

Dirección de Comunicaciones.

De naranjas a carbonatos:

un aporte a la transformación del CO₂

Aída Luz Villa Holguín

Docente

Ph. D. en Ciencias Biológicas

aida.villa@udea.edu.co

Carina Mosquera Bonilla

Química industrial, estudiante de

Maestría en Ciencias Químicas

yiceth.mosquera@udea.edu.co

Diana Marley Isaza Ciro

Estudiante de Ingeniería Química

diana.isazac@udea.edu.co

Compuestos obtenidos a partir de la molécula responsable del olor característico de las cáscaras de naranja podrían ser una alternativa para la disminución de emisiones de dióxido de carbono, al atraparlo y formar compuestos útiles con varias aplicaciones.



l olor de las cáscaras de la naranja se debe a las moléculas presentes en el aceite esen-

cial que se encuentra en ellas. Este aceite es una mezcla de compuestos químicos que les dan el aroma y el sabor característicos a las plantas, hojas y frutas. El de la naranja en particular puede extraerse de la cáscara de la fruta de diferentes formas. Una de ellas, por ejemplo, consiste en hacer pasar vapor de agua que arrastra los componentes volátiles que contiene. El aceite generalmente es utilizado como agente anticancerígeno, insecticida y bactericida, también en la fabricación de fragancias, sabores, cosméticos y jabones, y como agente antioxidante para prevenir enfermedades como la hipertensión, la diabetes y la arteriosclerosis.

Más que un olor, moléculas de un potencial reactivo químico

Del aceite esencial que se obtiene de la naranja también pueden obtenerse reacti-

vos útiles en la fabricación de productos que usamos cotidianamente. Este es el caso del limoneno, el principal compuesto químico presente en el aceite esencial de naranja cuya transformación con una fuente de oxígeno genera el epóxido de limoneno como una etapa intermedia para obtener sustancias de mayor valor y con más aplicaciones que el aceite esencial.

En el grupo de investigación de la Universidad de Antioquia Catálisis Ambiental, contamos con una línea de investigación que se centra en la transformación de diferentes compuestos presentes en los aceites esenciales. Para estas transformaciones utilizamos catalizadores sólidos, materiales que, preparados en el laboratorio permiten (en condiciones económica, ambiental y energéticamente favorables) que los compuestos presentes en los aceites esenciales sean transformados mediante diferentes reacciones en otros productos de mayor valor comercial como compuestos oxigenados que incluyen aldehídos, alcoholes y cetonas relevantes en múltiples aplicaciones industriales relacionadas con la industria de fragancias, medicamentos, sabores. En esta oportunidad, y con el apoyo del CODI, nos enfocamos en la transformación del epóxido de limoneno que, recordemos, es obtenido a partir del aceite esencial extraído de la cáscara de naranja, como un reactivo de interés para la conversión química del dióxido de carbono —CO₂— a carbonato de limoneno.

Carbonato de limoneno: una alternativa para disminuir las emisiones de CO₂

Este enfoque de transformación del epóxido de limoneno y el CO₂ surge como una alternativa del CO₂ ante el hecho de que las concentraciones de este gas en la atmósfera son cada vez mayores, al igual que sus impactos negativos sobre la Tierra y todos los seres vivos que la habitamos. El CO₂ atmosférico ha aumentado debido a procesos humanos (IPCC, 2021) y, por ejemplo, el aumento del flujo de este gas desde la atmósfera hasta el océano afecta los ecosistemas marinos al disminuir su pH o provocar un fenómeno llamado acidificación de los océanos, que pone en alto riesgo la vida de los corales. Colombia no está exenta de las consecuencias del cambio climático. El incremento de la temperatura del planeta no solo se manifiesta en intensas olas de calor y eventos extremos de lluvia, sino también en consecuencias negativas para los ecosistemas del país, como la pérdida de hábitats y biodiversidad, contaminación y reducción

de la cantidad del agua, incrementos en el régimen de lluvias y sequías, erosión y pérdida de nutrientes del suelo, la pérdida de áreas de glaciar, entre otras.

Es por esto que surge la necesidad de buscar e implementar métodos que nos permitan contribuir a la disminución de la concentración de CO₂ en la atmósfera y, así mismo, a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, en este caso de CO₂. Algunos métodos para lograr esto consisten en la captura y conversión del CO₂ en combustibles sintéticos como metanol, etanol y otros hidrocarburos utilizando energía renovable o en incorporarlo en la fabricación de materiales de construcción como el hormigón y el cemento. Adicionalmente, el CO₂ puede ser utilizado como materia prima para la producción de compuestos químicos como urea, polímeros y carbonatos. Debido a su origen de fuentes renovables, entre las alternativas de mayor interés está la conversión química del CO₂ y del epóxido de limoneno derivado del aceite esencial de naranja para producir un carbonato llamado carbonato de limoneno. Esta transformación es de interés porque es una alternativa de solución en la que el CO₂ pasa de ser un agente que contribuye al calentamiento

de la atmósfera a una materia prima. Adicionalmente, el carbonato de limoneno obtenido del CO₂ y del epóxido de limoneno es un compuesto biobasado, esto es, que se obtiene de la biomasa (cáscara de las naranjas), lo que le confiere características y propiedades deseadas en diferentes procesos industriales.

Transformar un gas de efecto invernadero con un compuesto de olor agradable en un producto valioso en procesos industriales

En el proceso de transformación del CO₂ y del epóxido de limoneno, que puede ser obtenido por transformación de compuestos de la cáscara de naranja, es necesario el uso de un catalizador o sustancia de ayuda en la reacción química. Este catalizador se adiciona, con el epóxido y el CO₂, que aunque no se consume en el proceso, ayuda a reducir la energía necesaria para que el CO₂ y el epóxido reaccionen, lo que facilita la inserción del CO₂. Para obtener los carbonatos cíclicos a partir del epóxido y el CO₂, el catalizador que se escoja es fundamental para que la reacción se facilite. Es por ello que en el grupo de investigación preparamos sólidos que contuvieran metales y partes de dichos sólidos con características necesarias para que, al estar presentes el epóxido y el CO₂, se generaran los cambios en las moléculas que permitieran la formación del producto buscado. Además del catalizador, también se debe buscar la temperatura y la presión adecuadas, pues influyen en la cantidad y la rapidez con que se forma el carbonato cíclico en el recipiente (reactor) en el que se encontrarán el epóxido, el CO₂ y el catalizador. La explicación del proceso de transformación del CO₂ y el epóxido de limoneno se representa mediante la infografía que también presenta el procedimiento con el que se obtiene el limoneno de la cáscara de naranja.



DE CÁSCARAS DE NARANJA A CARBONATO DE LIMONENO

La naranja es el cítrico más cultivado en el mundo, pero la gestión de los residuos derivados de la industria frutal sigue siendo un problema global. La transformación de sus cáscaras en un compuesto que podría ayudar a reducir el CO₂ atmosférico abre la puerta a la investigación de reactivos útiles en la lucha contra el cambio climático.

CO₂



La transformación del epóxido de limoneno y el CO₂ es una alternativa que surge ante el aumento de las concentraciones de este gas de efecto invernadero que afecta el clima de la Tierra y genera impactos negativos en los ecosistemas y en todos los seres vivos.



El incremento del CO₂ atmosférico, causado por actividades humanas, está afectando los ecosistemas marinos al disminuir el pH del océano, con un impacto significativo en la vida marina.



Colombia enfrenta graves consecuencias del cambio climático, como la pérdida de hábitats, la disminución de la biodiversidad y **la pérdida de un 90 % del área glaciar desde el siglo XVIII.**

Obtención del epóxido del limoneno

1



Cáscaras de naranja

2



Aceite esencial de naranja

3



Oxidación
Epóxido de limoneno

El aceite esencial de naranja contiene entre **90 %-98 %** de limoneno.

Con **27 g** de limoneno se obtienen **23 g** de epóxido de limoneno.



A partir de las cáscaras de naranja se puede obtener un aceite que contiene el limoneno, que, además de ser útil como aromatizante y saborizante, se puede oxidar en compuestos de utilidad en varias industrias.

Reacción de carbonatación

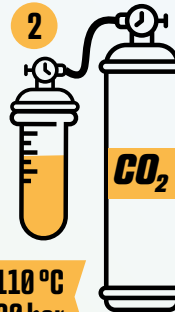
1



Catalizador, co-catalizador, epóxido de limoneno

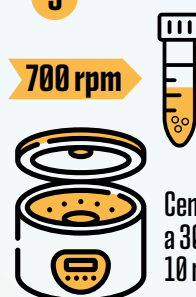
700 rpm

2



110 °C
30 bar

3



700 rpm

Centrifugar a 3000 rpm, 10 min

4



Catalizador



Productos de reacción



Carbonato de limoneno



De la oxidación del limoneno se produce un compuesto que en presencia de CO₂ y otras sustancias genera el carbonato de limoneno, que se considera un compuesto biobasado por obtenerse a partir de biomasa.

Aplicaciones del carbonato de limoneno



Productos antibacterianos



Baterías de teléfonos móviles



Plásticos biodegradables



Fabricación de caucho



El aceite esencial extraído de las cáscaras de la naranja, al someterse a procesos de oxidación, genera un reactivo importante en la transformación de CO_2 .
Fotografía: Freepik.es

Al terminar la reacción, debemos determinar cuánto del epóxido de limoneno, que se obtuvo por transformación del aceite esencial de naranja, se convirtió a carbonato de limoneno, es decir: cuál fue la conversión del epóxido y que cantidad de carbonato de limoneno obtuvimos en nuestros experimentos. Estos estudios los realizamos con una serie de equipos que nos permitieron identificar los cambios químicos en las moléculas y determinar en qué proporción cambió el reactivo inicial y cuánto se formó del producto deseado.

Así, pudimos determinar si las selecciones que hicimos de catalizador, temperatura, presión y tiempo eran adecuadas para que de la reacción del epóxido de limoneno y CO_2 se obtuviera principalmente el carbonato de limoneno. Encontramos que el 59 % del epóxido adicionado se transformó y que, de lo transformado, el 98 % era carbonato de limoneno, lo cual se entiende como un avance en la transformación de CO_2 con aceites esenciales, pues ha sido un proceso poco estudiado en presencia de catalizadores sólidos. Adicionalmente, pudimos separar el sólido y utilizarlo en varias reacciones después de un tratamiento previo, y así evitamos utilizar en cada reacción un catalizador nuevo.

Con este trabajo no solo encontramos una nueva forma de utilizar y transformar el CO_2 , sino que también logramos la síntesis de un compuesto biobasado mediante la

Esta transformación es de interés porque es una alternativa de solución en la que el CO₂ pasa de ser un agente que contribuye al calentamiento de la atmósfera a una materia prima

reacción del CO₂ con el epóxido de limoneno. Y es que el carbonato de limoneno obtenido del CO₂ y del epóxido de limoneno, obtenido a su vez por la transformación del aceite de la cáscara de naranja, se posiciona como un compuesto renovable y de base biológica para diferentes aplicaciones en diversas industrias y para la fabricación de productos que usamos en nuestra vida diaria, como el caucho, las baterías de iones de litio que se encuentran en los teléfonos móviles, los plásticos biodegradables y los productos antibacterianos.

Finalmente, con nuestro trabajo de investigación encontramos una forma de dar valor agregado al procesos de transformación del CO₂, utilizando un compuesto derivado del aceite esencial de naranja para la producción de un compuesto biobasado como el carbonato de limoneno. Aún requerimos de más estudios que nos permitan obtener este compuesto a gran escala y a menores temperaturas y presiones, pero los resultados de esta investigación son relevantes para identificar que el catalizador utilizado es útil para esta reacción en la que principalmente obtenemos un producto útil a partir de un gas de efecto invernadero. **X**

Glosario

Biobasado: Productos y materiales que se derivan de materias primas renovables en lugar de fuentes fósiles como el petróleo.

Carbonato de limoneno: producto que en su estructura química contiene un ciclo adicional al del limoneno por la reacción del epóxido de limoneno con el dióxido de carbono.

Es un compuesto biorrenovable porque se obtiene de la biomasa.

Epóxido de limoneno: Compuesto químico oxigenado obtenido a partir del limoneno y una fuente de oxígeno que se puede utilizar para obtener carbonato de limoneno.

Limoneno: Es la sustancia natural principal que compone el aceite de cítricos como la naranja.

Este texto hace parte del proyecto de investigación «Fijación de CO₂ en epóxidos de aceites esenciales para la síntesis de carbonatos cíclicos mediante procesos catalíticos heterogéneos», CODI 2020-33471.

Absorber la luz en delgadas películas:

la revolución de las celdas solares de perovskita

Santiago Mesa Espinal

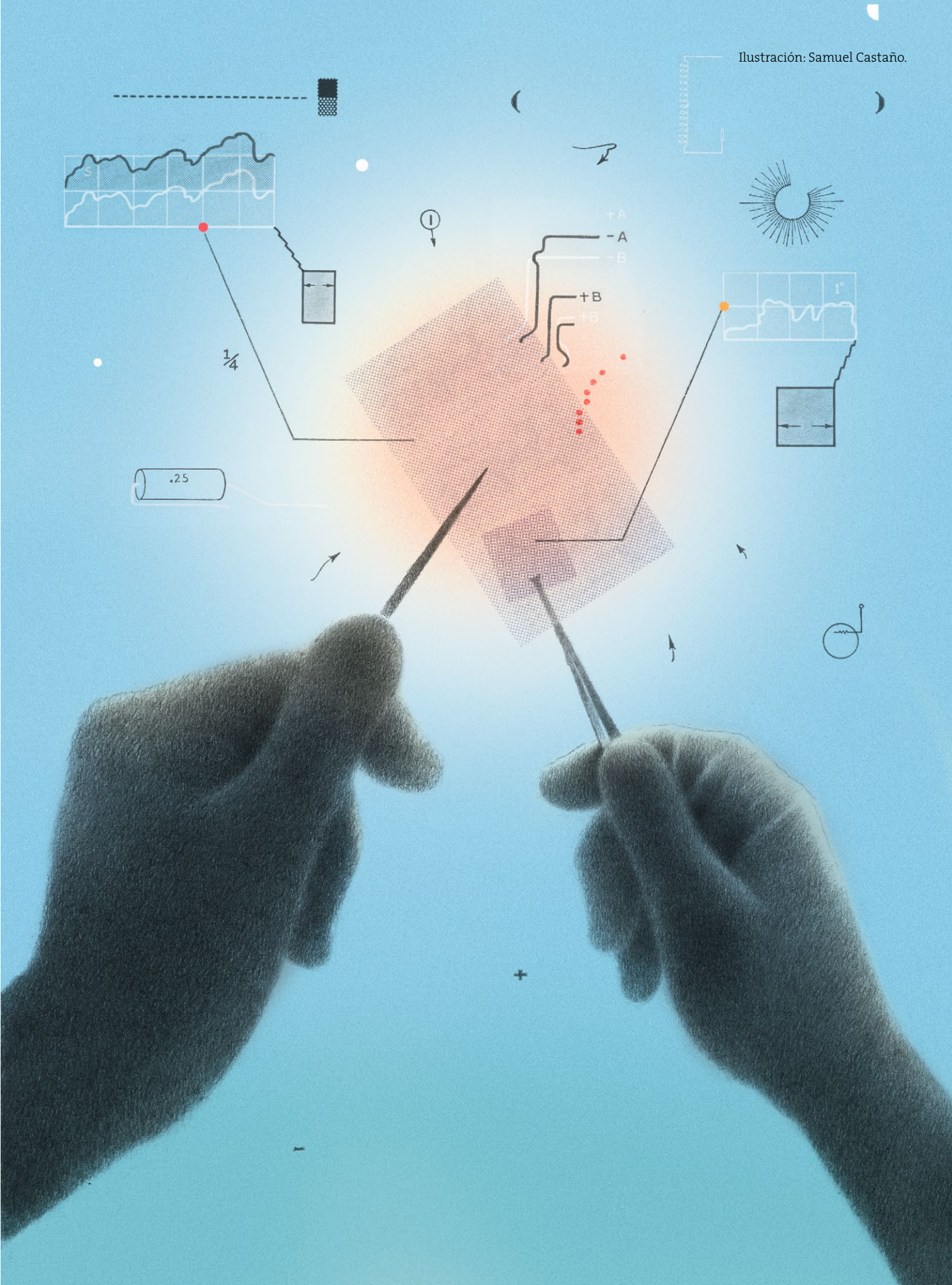
Ingeniero de materiales y magíster en Ciencias Químicas
santiago.mesa@udea.edu.co

Franklin Jaramillo Isaza

Ingeniero químico y Ph. D. en Química
franklin.jaramillo@udea.edu.co

Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales
—CIDEMAT—

Imaginemos ventanas que generan electricidad, dispositivos que se recargan con la luz del día y paneles impresos tan fácilmente como un periódico. Las celdas solares de perovskita, desarrolladas como un sánduche de delgadas láminas capaces de transformar la luz en energía a bajas temperaturas, prometen desarrollos de bajo costo que avanzan hacia la democratización del acceso a la energía.





El geólogo alemán Gustave Rose recibió en 1839 un mineral, proveniente de los montes Urales, que debía identificar. Se

trataba de un mineral cristalino de titanato de calcio que recibió el nombre de perovskita en honor al coleccionista ruso de minerales, el conde Lev Aleksévich Perovski. Hoy denominamos perovskita a una familia de compuestos sintetizados químicamente que mantienen, en términos generales, la estructura cristalina descrita del material original. Este tiene propiedades de fotoconductividad, es decir, la capacidad de convertir luz en electricidad.

La historia moderna de las perovskitas en aplicaciones para la producción de energía solar comenzó en 2009 gracias a un hallazgo coincidental: el investigador Akihiro Kojima no lograba disolver un material con estructura de perovskita en solventes convencionales. Tras observar a sus colegas usar otro solvente en particular, logró, además de disolverlo, fabricar la primera celda solar de perovskita del mundo. Esta primera celda, elaborada a partir de películas de la nueva solución, arrojó una eficiencia de alrededor del 3 % que, aunque baja, sentó un precedente para la investigación en esta área. En cuestión de una década y de numerosas pruebas de hibridaciones de materiales, se

ha logrado una eficiencia de más del 25 %. Este desarrollo ha llevado a la comunidad científica a interesarse en las perovskitas como una solución viable y económica para aumentar el uso de la energía solar y contribuir a la transición energética.

Un breve paso por las celdas solares más comunes

Para comprender mejor el desarrollo de las tecnologías basadas en las perovskitas es importante conocer con qué funciona la tecnología fotovoltaica actual. Los paneles solares convencionales que vemos en techos y estructuras están formados por múltiples módulos interconectados. Su conjunto compone un panel solar de delgadas láminas de silicio encapsuladas en varias capas protectoras con las que forma la estructura típica del panel solar: varias celdas en forma de cuadrícula.

En términos generales, la producción de estas láminas de silicio se lleva a cabo en cinco etapas: calentamiento, purificación, dopado, conformado y pulido. Al final de estas etapas se obtiene un silicio de altísima pureza, la cual es indispensable para su uso final en aplicaciones en celdas solares. Si bien los paneles solares de silicio están muy bien consolidados como tecnología, existen alternativas prometedoras como las celdas solares de perovskita. Una de sus principales ventajas es que pueden fabricarse mediante procesos de recubrimiento en solución, lo que permite crear una tinta con los materiales activos de la celda solar y aplicarla directamente sobre superficies. Este enfoque simplifica significativamente el proceso, por lo que estos materiales han captado un creciente interés en la investigación.

Las de perovskita: promesa de bajo costo y flexibilidad

Varios atributos de las celdas solares de perovskita nos permiten pensar que está revolucionándose el campo de la energía solar y que podría transformarse nuestro futuro energético. Están constituidas por una serie de capas delgadas, de las cuales algunas son de perovskita. Pensemos en un sánduche: el pan inferior es el soporte o sustrato; lo que sería el queso en nuestra comparación es la capa inferior necesaria para el transporte electrónico; el jamón en el centro sería la perovskita, responsable de captar la luz; la lechuga en la capa superior sería la responsable del transporte de cargas. El pan superior

que completa el sánduche sería un electrodo de un metal que conduzca la electricidad generada.

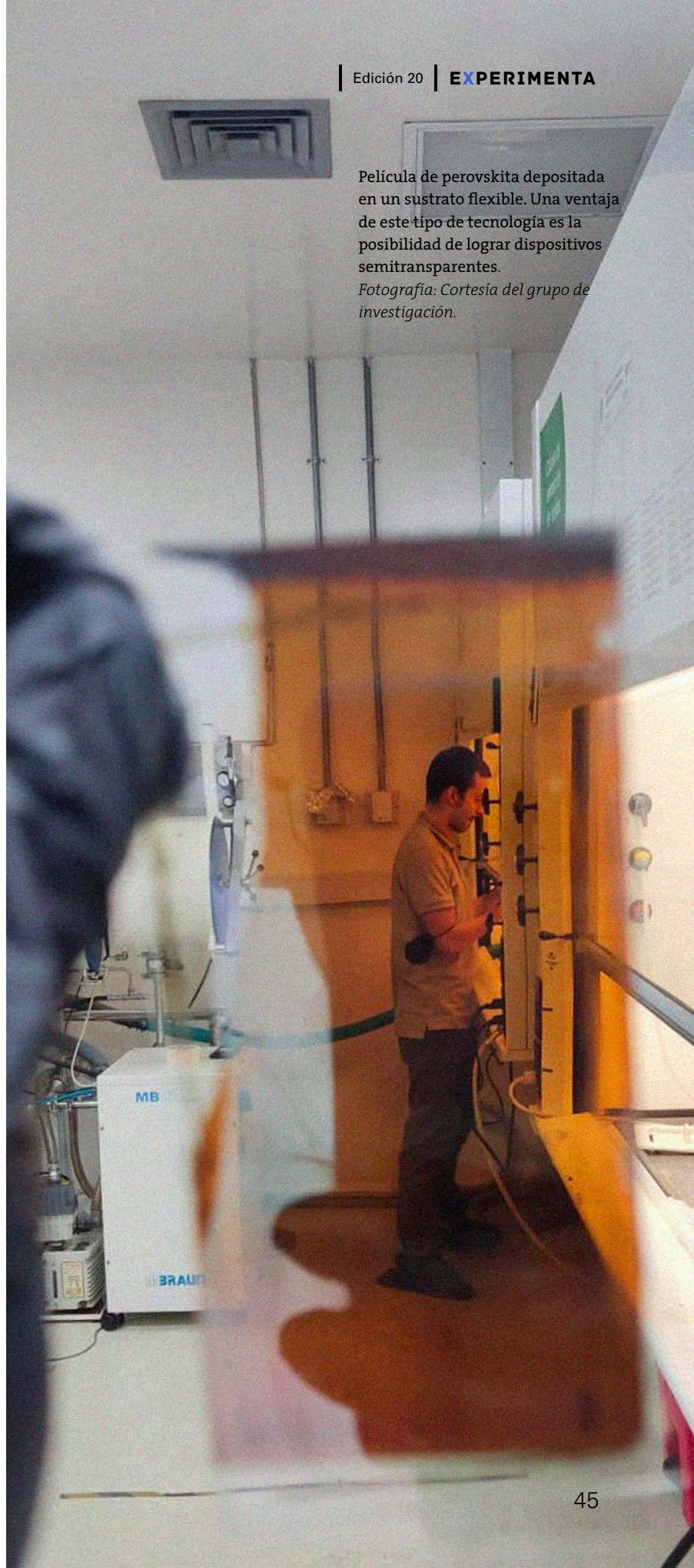
En comparación con las celdas solares tradicionales de silicio, las celdas de perovskita son más fáciles y baratas de fabricar, y su eficiencia en la conversión de luz a electricidad ha mejorado ostensiblemente en los últimos años. En particular, las celdas de silicio requieren procesos de producción costosos, de altas temperaturas (mayores a 900 °C) y ambientes con altísimos estándares de limpieza. En cambio, las celdas de perovskita pueden producirse a través de métodos de deposición en solución; es decir, es posible usar tintas de las distintas capas para fabricar una celda solar, ese sánduche del que hablábamos antes. Esto significa que las celdas pueden fabricarse a bajas temperaturas (menores a 150 °C), de manera continua y aplicarse sobre sustratos flexibles y livianos, lo que las hace adaptables a diferentes condiciones de luz y de superficies.

Versátiles y portátiles, pero aún inestables

Todas estas ventajas, abren la puerta a una variedad de aplicaciones inmensa. Imaginemos celdas solares integradas en las ventanas de los edificios o en dispositivos portátiles que podemos llevar con nosotros. O imaginemos celdas que puedan imprimirse de manera rápida usando equipos de bajo costo con el fin de democratizar el acceso a la energía. Las posibilidades son inmensas.

Película de perovskita depositada en un sustrato flexible. Una ventaja de este tipo de tecnología es la posibilidad de lograr dispositivos semitransparentes.

Fotografía: Cortesía del grupo de investigación.



No obstante, y a pesar de sus numerosas ventajas, las celdas solares de perovskita todavía enfrentan algunos desafíos importantes. Uno de los problemas más críticos es su estabilidad y durabilidad. Las perovskitas pueden degradarse rápidamente cuando se exponen a la humedad y el oxígeno de manera directa, lo que limita su vida útil y afecta su rendimiento en el largo plazo. Para abordar estos problemas, se están desarrollando nuevas composiciones de perovskita, nuevas capas de materiales y recubrimientos protectores que limiten el acceso de la humedad y el oxígeno al dispositivo. En ese sentido, aún queda bastante investigación por desarrollar para que las celdas de perovskita sean más viables en integraciones finales. Es en este punto que el Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales —CIDEMAT—, en su línea de energía, ha estado investigando durante los últimos años.

El reto de hacer láminas más grandes

Este grupo de investigación ha estado trabajando en sistemas energéticos durante más de veinte años, diez de estos en celdas de perovskita. Al principio de su investigación, el grupo se enfocó en desarrollar metodologías que le permitiera fabricar celdas con eficiencias

aceptables para seguir mejorando los rendimientos. Inicialmente se fabricaron pequeñas celdas solares de aproximadamente 8 mm² con una eficiencia de aproximadamente 18 %. Para ello el equipo de trabajo desarrolló diferentes capas de materiales en la búsqueda de celdas más estables y eficientes. Por ejemplo, se desarrolló una tinta de nanopartículas de óxido de níquel dispersadas en agua para la primera capa de la celda, lo que la hizo más estable y fácil de fabricar. Como resultado de la investigación y metodologías desarrolladas en el grupo, se realizaron prototipos de celdas solares de perovskita.

Esto implicó pasar de los 8 mm² de celda solar que se tenían inicialmente a 25 cm², ¡un área más de 300 veces mayor!, todo un reto en la fabricación que llevó a una investigación intensiva relacionada con metodologías para escalar la tecnología y su integración en sistemas energéticos. Así, el grupo fabricó mini-módulos fotovoltaicos de 25 cm² basados en nuevos materiales y realizados mediante métodos de procesamiento de las tintas desarrolladas. Dado que era necesaria la integración de estos mini-módulos, fueron puestos a prueba en condiciones reales de operación para las condiciones climáticas colombianas, lo que constituyó un hito puesto que esta es la primera vez que en el país se probó tecnología solar basada en perovskita.

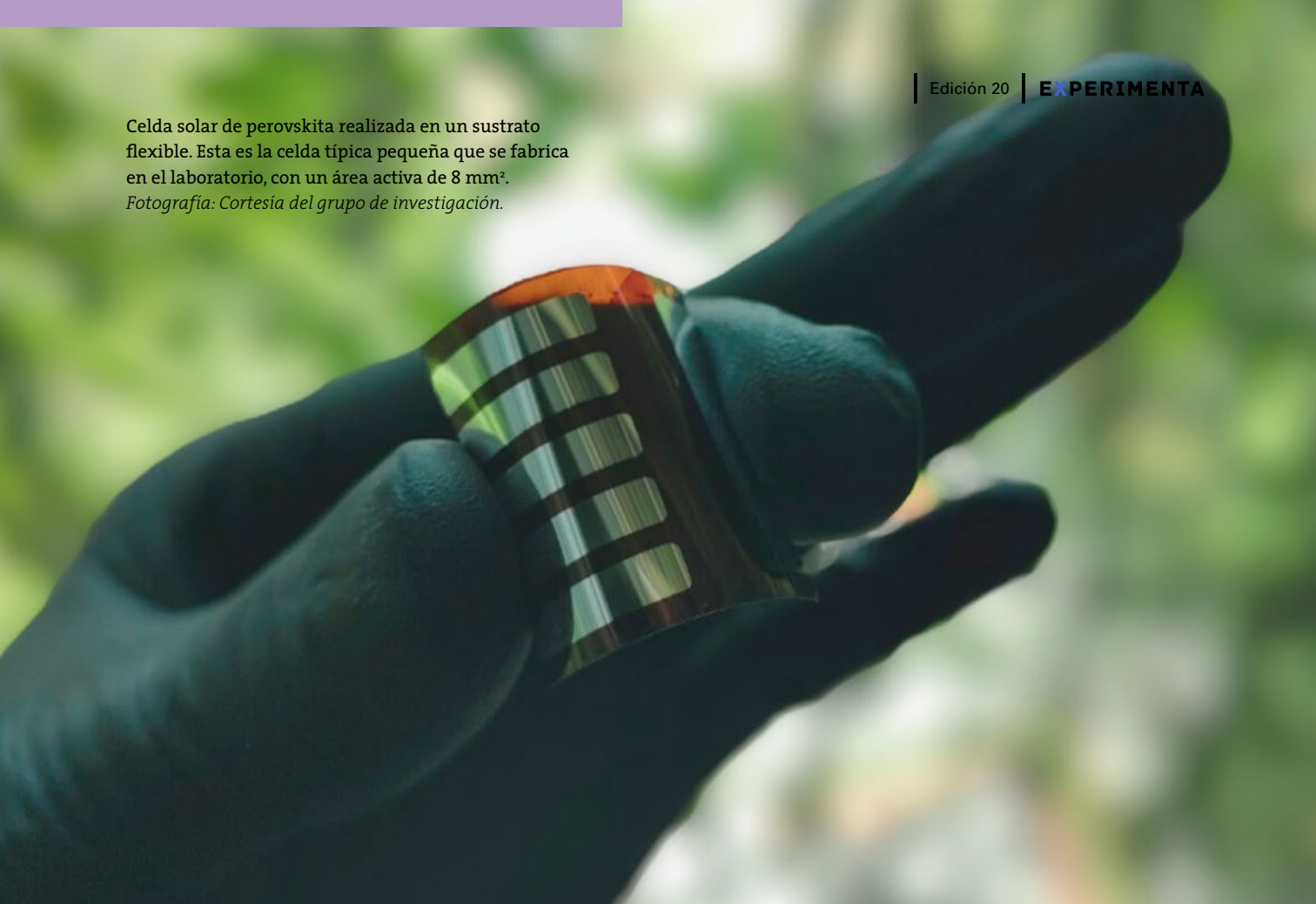
Probar en el desafiante clima del trópico

Estas pruebas en condiciones reales fueron cruciales para evaluar el rendimiento y la durabilidad de las celdas solares de perovskita en el contexto climático colombiano y para entender cuáles podrían ser los pendientes en el contexto de una aplicación potencial. Esto implicó innovaciones en el encapsulamiento de los mini-módulos, esencial para protegerlos de la degradación por la humedad y el oxígeno, lo que extendió su vida útil. Los mini-módulos probados presentaron un voltaje de 3 voltios con una eficiencia de aproximadamente 13 %, lo suficiente para darle carga a un celular o encender un pequeño arreglo de luces LED.

El impacto potencial de las celdas solares de perovskita es inmenso, y con lo realizado por el grupo CIDEMAT se espera aportar a la revolución energética que está en ciernes. La investigación desarrollada sobre los desafíos inherentes de la tecnología permite imaginar un futuro en el que los edificios no solo consuman energía, sino que también la generen a través de sus propias ventanas

Celda solar de perovskita realizada en un sustrato flexible. Esta es la celda típica pequeña que se fabrica en el laboratorio, con un área activa de 8 mm².

Fotografía: Cortesía del grupo de investigación.



y fachadas y, por ejemplo, los dispositivos electrónicos se carguen automáticamente con energía solar. El sueño de desarrollar tecnología solar local y democratizar el acceso a la energía continúa con el grupo CIDEMAT. ✕

Glosario

Dopado: Proceso de añadir otros elementos químicos a un semiconductor, como el silicio, para modificar sus propiedades eléctricas.

Este texto hace parte del programa SÉNECA, en el proyecto «Desarrollo nacional de tecnología solar fotovoltaica de última generación e implementación de sistemas de alto desempeño para las condiciones climáticas colombianas».

GASURE

Investigación
para la respuesta
a las necesidades
sociales y
productivas

Carmenza Uribe Bedoya

Química. Directora de la revista *Experimenta*
Profesora jubilada de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Antioquia

Desarrollo de un quemador de aire inductor
para calentamientos a alta eficiencia.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández,
Dirección de Comunicaciones.



Tuvieron que pasar millones de años para que el ser humano aprovechara el petróleo, el carbón y el gas natural como fuentes de energía. Estos combustibles se formaron en el fondo del mar y de los grandes lagos a partir de la descomposición de la materia orgánica de animales, plantas, microorganismos. Los humanos primitivos observaron la existencia del gas natural en forma de llamaradas que ocurrían cuando caía un rayo en un pantano. La primera interpretación de este fenómeno osciló entre la magia y el misterio.

Actualmente, el gas natural aporta a la sociedad no solo comodidad doméstica sino que cubre otras necesidades: la generación de energía eléctrica, la producción de fertilizantes y el abastecimiento energético a sectores industria-

les, lo cual facilita una amplia cantidad de actividades. Desde las primeras explotaciones de yacimientos de gas natural en Irán, hace más de 8000 años, pasando por el uso de este en China y Japón así como en las civilizaciones griega y romana, hasta las aplicaciones actuales, son diversas las prácticas de explotación y uso de este recurso natural.

En Colombia se habían introducido algunos usos esporádicos del gas desde la década de los 70 del siglo XX. Se destacan descubrimientos de los yacimientos costa afuera (offshore) de Chuchupa y en tierra adentro (onshore) de Ballena en la Guajira; la disponibilidad de estos recursos permitió el uso del gas natural en las principales ciudades de la región Caribe. Pero solo fue hasta 1986, con el programa «Gas para el cambio», gracias a la interconexión nacional de los yacimientos de la Guajira con las ciudades del interior del país, entre ellas Medellín, que se hizo posible su masificación.

Los inicios del grupo de investigación

El interés en estudiar temas relevantes en la investigación de la explotación y el uso del gas natural en la Universidad de Antioquia surgió a partir de la crisis energética que sufrió Colombia a principios de los 90, debida al «apagón» y al racionamiento de energía eléctrica. Fue el profesor Andrés Amell, ingeniero mecánico y magister en economía de la energía y los recursos naturales, quien conjugó su preocupación por el contexto energético con el interés en la formación de profesionales de estas temáticas. De esta preocupación surgieron líneas de investigación adoptadas por el conjunto de personas que iniciaron su trabajo en grupo:

Antecedentes

Antes de la constitución del grupo GASURE en el año 1995 con la participación en la primera convocatoria nacional para la clasificación de grupos de investigación, se dieron algunas dinámicas y hechos significativos para la creación del grupo.

1992

Primera ponencia en evento nacional: «Ciencia contra la oscuridad».

1993

Primera cooperación internacional recibida: Gaz de France.

1993

Primer artículo de divulgación científica: Significado y alcance del uso racional de la energía, (01202367), Revista Universidad de Antioquia.

1994

Primera pasantía internacional en el laboratorio de investigación Cerug de Gaz de France.

Febrero**1995**

Creación oficial del grupo GASURE. Convocatoria de Colciencias de clasificación de grupos de investigación en Colombia.

- Aplicación del gas natural en la generación eléctrica.
- Combustión de combustibles gaseosos fósiles y renovables.
- Incidencia de condiciones atmosféricas sobre sistemas energéticos térmicos.
- Motores térmicos y combustibles alternativos.
- Uso racional de la energía y economía energética.

Dentro de este contexto, y con base en la formación del profesor Amell, se concibió también el interés por la interconexión gasífera de la Costa Atlántica con el interior del país, además del estudio del papel de las Empresas Públicas de Medellín —EPM— en lo relacionado con la ingeniería del transporte y uso del gas, lo cual abrió la puerta a la academia para profundizar en el conocimiento de los fenómenos de la termodinámica y la combustión.

Con todo ello, se fue conformando una agenda de investigación en los aspectos más relevantes del estudio, tanto desde la perspectiva mundial como de las condiciones locales. Fueron unos años iniciales de seguimiento al avance en el conocimiento y su aplicación, de comprensión de los problemas relevantes del desarrollo social y económico en lo pertinente a las fuentes energéticas, pero también fue la articulación entre contexto, conocimiento y formación académica, lo que llevó años más tarde a una identidad en el quehacer del grupo de investigación.

Durante los primeros años surgió la primera pregunta que marcaría gran parte del futuro del grupo: **¿cuál es la relación entre combustión y altura sobre el nivel del mar?** En los años 90 se sabía que el estado del arte tecnológico estaba desarrollado para bajas alturas sobre el nivel del mar, en particular a nivel del mar. Fue por ello que se originó un

interés especial por el efecto de la altura sobre la combustión del gas.

Una invitación al profesor Amell de la empresa estatal gasífera Gaz de France a París, para desarrollar una pasantía de tres meses, fue determinante puesto que trazó la ruta de la ingeniería relacionada con la combustión del gas natural, al igual que el efecto de la altura sobre los sistemas térmicos y su enfoque en proyectos de investigación concretos.

Fortalecimiento académico: camino seguro

Junto con las primeras definiciones temáticas y conceptuales, compañeros de aventura se fueron formando a nivel de pregrado y posgrado: John Ramiro Agudelo, ingeniero mecánico, doctor en ciencias térmicas de la UPM; Lorenzo Barraza, químico e

Enero

1996

Primer proyecto de investigación con financiación del grupo: Comportamiento de plantas en ciclo combinado en el piso térmico colombiano.

1996

Primer proyecto de estudiante de pregrado orientado por el grupo: Mauricio Berrueco.

1996

Primeros dos proyectos presentados en el SUL.

1997

1996

Primer estudiante con beca doctoral de Colciencias: John Agudelo.

1997

Primer curso de pregrado como resultado de la agenda de I+D+I del grupo: Combustión Gaseosa.

1998

Primer trabajo de consultoría: EPM.

1999

Primer premio nacional Otto de Greiff en Ingeniería. Francisco Cadavid y Juan Carlos Ospina.

ingeniero metalúrgico; Elías Gómez, ingeniero químico y doctor en ingeniería de la UdeA. Posteriormente se unirían los profesores Francisco Cadavid e Iván Bedoya.

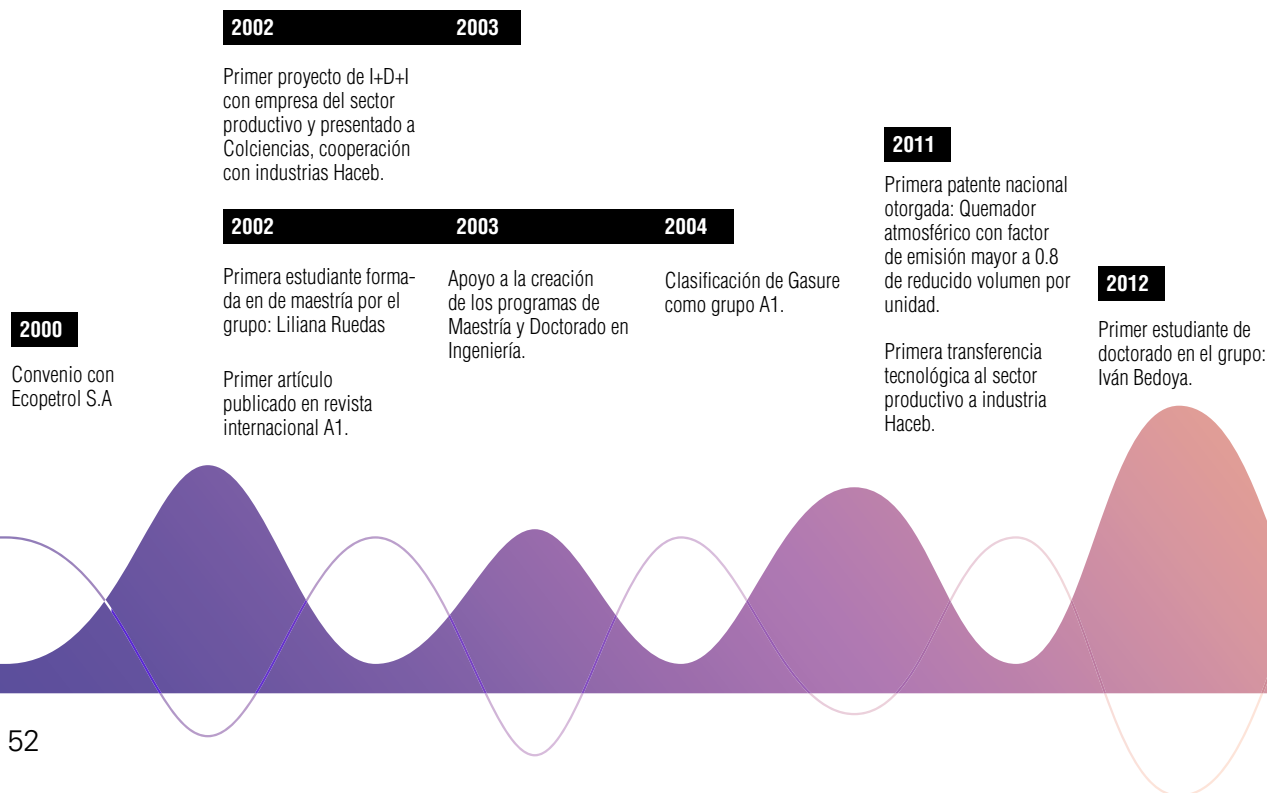
Con base en lo anterior, el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, —GASURE— se creó en 1995. Se formalizó una agenda de trabajo con una rigurosidad que permitió presentar proyectos de investigación y diseñar las actividades para los estudiantes de posgrado. Hasta el año 2000, con el personal disponible, el grupo se centró en actividades de extensión y en proyectos universitarios en la categoría de menor cuantía.

Así se configuraron dos de las características de GASURE: la preocupación por entender el contexto para no perder pertinencia y la necesidad de fortalecimiento académico para no perder legitimidad y confianza. Entre 2001 y 2002 se generó un convenio con Ecopetrol sobre los usos industriales y vehiculares del gas natural y, con el fin de mantenerse firmes en el campo académico, el grupo participó en la creación de un doctorado en ingeniería con la línea de investigación en combustibles gaseosos. También en 2002 el grupo avanzó en el ciclo de la investigación hacia la innovación. En 2003 se inició la línea de construcción de máquinas orientadas hacia biocombustibles. En todo este tiempo se mantuvo la relación con las empresas.

En 2014, falleció uno de los discípulos más destacados del grupo, el profesor Francisco Cadavid, quien ayudó a consolidar las bases de las líneas investigativas.

Proyectos más ambiciosos: mejores resultados

Pero el grupo no podía quedarse con los proyectos universitarios de extensión y los de menor cuantía, sino que debía buscar retos mayores. Llegó entonces el tiempo de la presentación de proyectos de investigación de mayor nivel en cuanto a su estructuración conceptual y a su financiamiento. Obtuvieron de parte de Colciencias la financiación para un proyecto cuyo objetivo fue el diseño y construcción de un proto-





Andrés Amell Arrieta,
coordinador de GASURE.
Fotografía: Alejandra Uribe
Fernández, Dirección de
Comunicaciones.

2022

Primer artículo internacional publicado en una revista internacional A1

Desarrollo de la primera planta piloto de Power to Gas en Colombia, ubicada en la Guajira.

Desarrollo de un laboratorio móvil para diagnóstico en ruta del comportamiento ambiental y energético de motores.

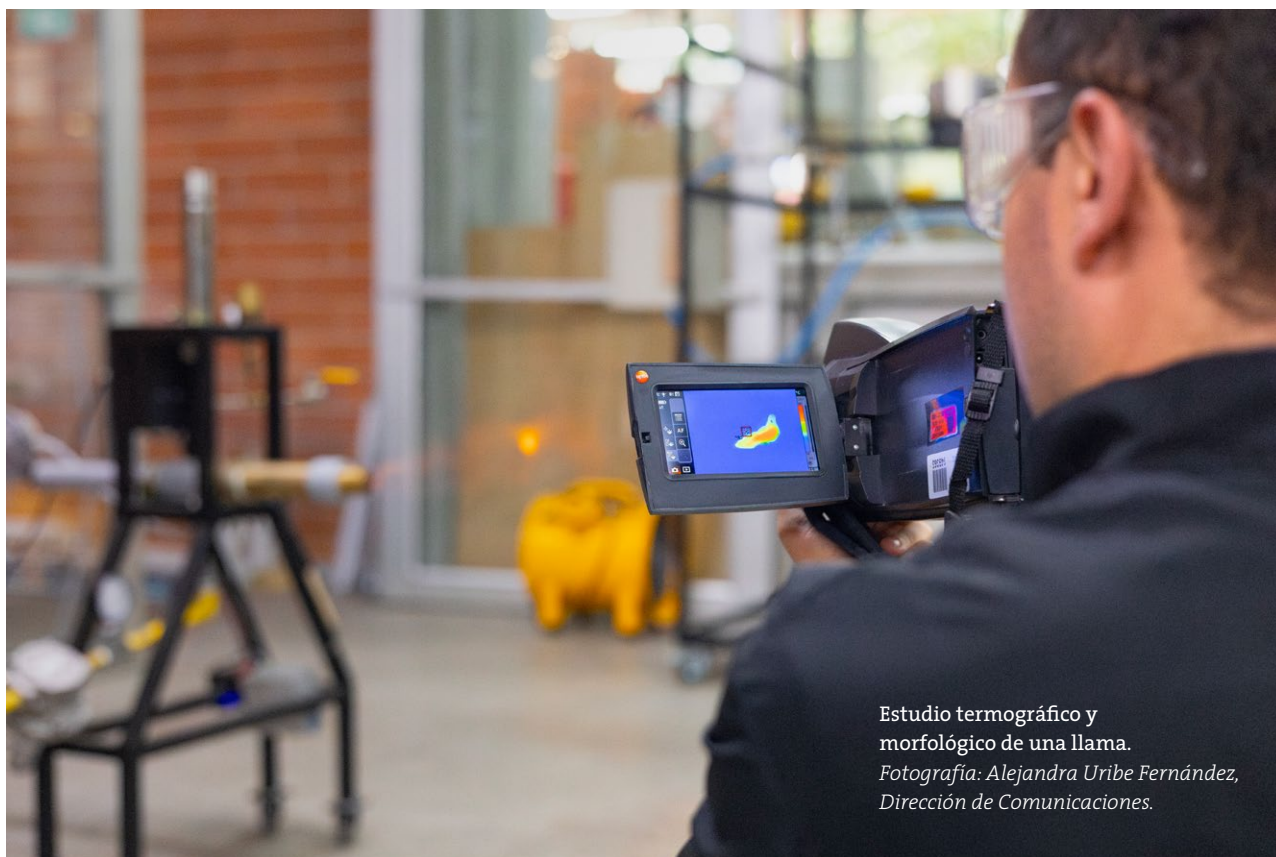
2024

Cooperación actual, con la Agencia Espacial de Cooperación.

tipo de quemador atmosférico. También se logró el financiamiento de la empresa Haceb para averiguar los efectos de la altitud en la combustión a gas de equipos situados entre 0 y 2600 msnm, proyectos con los que se fortaleció el ciclo de investigación e innovación. En 2007 se solicitó una patente UdeA-Haceb por el quemador atmosférico desarrollado en el grupo. Este quemador atmosférico, al ser eficiente para condiciones de altura, resolvió problemas energéticos en zonas con diversidad de pisos térmicos.

«Con este quemador atmosférico, el equipo de investigadores innovó con un sistema que permite mayor entrada de aire frente a los quemadores convencionales, mejor calidad de la combustión al reducir significativamente las emisiones de monóxido de carbono, una alta eficiencia energética y mayor transferencia del calor liberado hacia el objeto que se requiere calentar... también logró un sistema más compacto. El éxito ha sido lograr escalar el prototipo a nivel de comercialización, para lo cual la empresa ha sido un factor determinante. Como lo explica el investigador, “Se cerró el círculo virtuoso de una innovación que no se queda en la Universidad, sino que va a la economía, a la industria y a la sociedad. Se demuestra que una empresa nacional puede tener desarrollos innovadores que mejoran su competitividad en un mundo tan reñido como el de los electrodomésticos, especialmente ahora con el TLC».

UdeA Noticias,
Julio 17 de 2012



Estudio termográfico y morfológico de una llama.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández,
Dirección de Comunicaciones.

Innovación en sistemas de combustión

Otro resultado importante en el campo de desarrollo de sistemas de combustión se dio en 2007 con la investigación fenomenológica sobre la combustión diluida y la recuperación de calor residual por auto regeneración, lo que permitió apropiarse de fundamentos conceptuales para la innovación, el diseño y construcción de un horno autorregenerativo cuyo propósito es la fusión de materiales no ferrosos y el tratamiento térmico; este proyecto se generó en una convocatoria del sistema de I+D de EPM. Con base en este desarrollo, en octubre de 2011 se obtuvo una patente compartida entre la Universidad de Antioquia y EPM.

En el transcurso de la década de los 90 y en la mitad de la primera década de este siglo, el grupo ha realizado grandes esfuerzos en la investigación fenomenológica y la innovación tecnológica en sistemas de combustión avanzada eficientes, sostenibles y flexibles al uso de combustible y comburente de composiciones químicas diferentes. Entre los resultados de estos es-

fuerzos se destacan las investigaciones e innovaciones en la combustión sin llama, la combustión en medio poroso, la combustión sumergida y la oxicomustión con y sin llama, la combustión del hidrógeno y de sus mezclas con gas natural.

En ese periodo se logró, además, consolidar una metodología para que, una vez identificada la pertinencia de un problema en el contexto nacional y su relación con las tendencias del estado del arte, fuera posible generar nuevo conocimiento e información que permitiera obtener el *know-how* para realizar innovaciones tecnológicas, transfe-



Sistema de combustión sin llama de alta eficiencia energética y bajas emisiones.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.

rencias tecnológicas al entorno, sustentar actividades de apropiación social de conocimiento y formación de recurso humano en los programas de posgrado de la Facultad de Ingeniería: doctorado, maestría, pregrado y jóvenes investigadores.

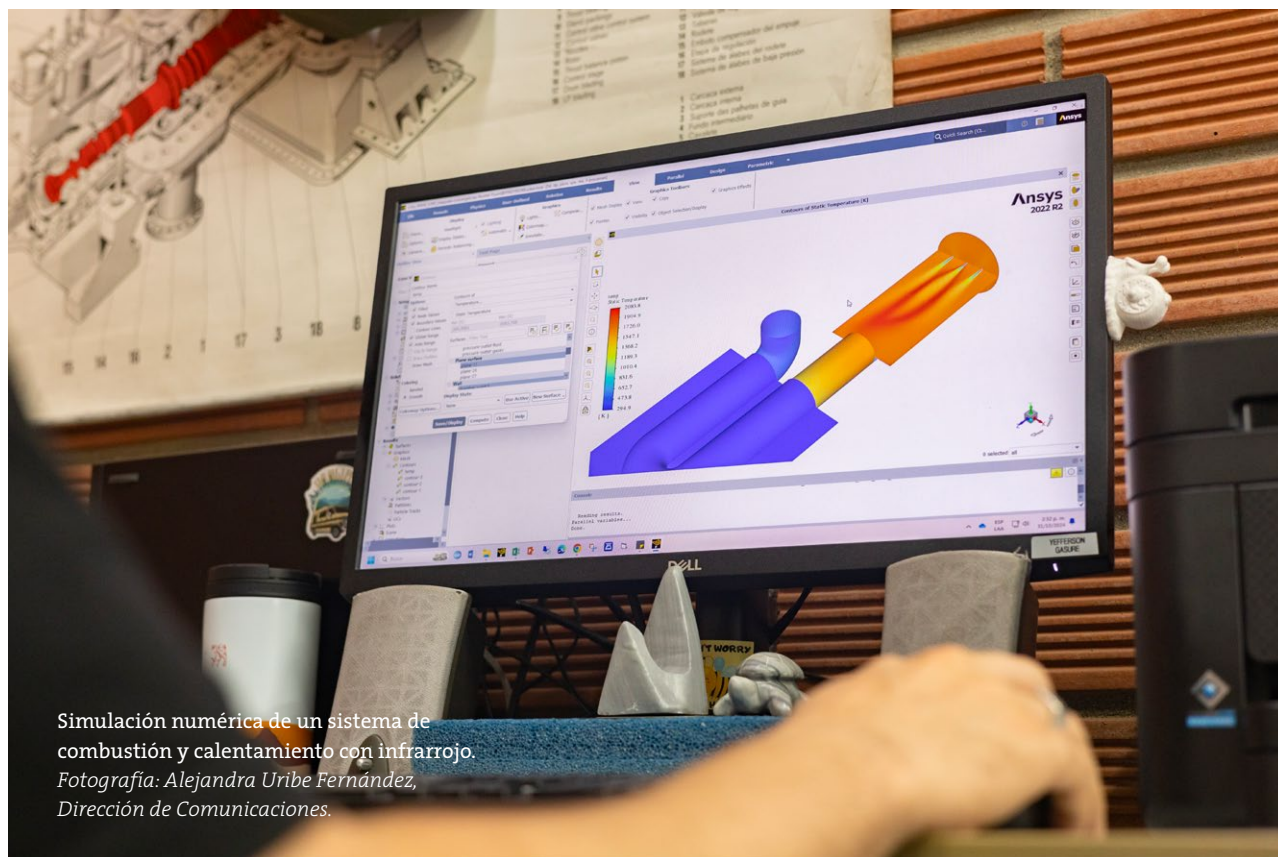
Trabajo en red y proyección futura

Entre los años de 2012 y 2024, el grupo GASURE, en lo que concierne a la pertinencia del trabajo colaborativo y de la necesidad de transferir conocimiento y

formación a instituciones y regiones de menor desarrollo académico y científico, ha liderado la formulación, dirección científica y ejecución de programas para conformación de redes interinstitucionales e intersectoriales, participando en convocatorias del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología y de cooperación internacional. En este contexto se mencionan las redes Combustión Avanzada de Uso Industrial Incombustion fase I, Incombustion fase II, la alianza Sostenibilidad Energética para Colombia —Séneca— y la Alianza para la Eficiencia Energética y el Hidrógeno, esta última en ejecución entre 2023 y 2027.

Compromiso con la política pública y la internacionalización

El grupo no solo ha contribuido a través de la investigación, sino también a través de la participación en la definición de políticas públicas del sector energético. Su coordinador se desempeñó como con-



Simulación numérica de un sistema de combustión y calentamiento con infrarrojo.
Fotografía: Alejandra Uribe Fernández,
Dirección de Comunicaciones.

sejero del Programa Nacional de Investigación en Energía y Minería de Colciencias (2005-2011), en el que aportó una visión académica y técnica a la planificación energética del país. La capacidad del grupo para extender la colaboración científica también puede verse en su participación tanto en el «Programa para el fortalecimiento de procesos de eficiencia energética para sectores industriales con alta demanda de energía térmica en Colombia», financiado por el Programa de Cooperación de la Comunidad Económica Europea para la Eficiencia Energética en América Latina denominado Euroclima + entre 2021 y 2025, como en el Programa ECOS-ord de intercambio de investigadores entre Colombia y Francia entre 2017 y 2022.

El mérito de una agenda de I+D+I, para que no pierda pertinencia y vigencia histórica, es tener sensibilidad para captar las señales del entorno y las demandas de conocimiento e innovación para la solución de problemas nacionales o globales complejos cuya solución tiene impactos económicos, sociales, de sostenibilidad, tecnológicos y científicos.

Sin duda, la transición energética y las exigencias del Objetivo 7 de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas a 2030 (triplicar la penetración de las energías renovables, duplicar la eficiencia energética y garantizar el acceso de electricidad y combustibles limpios para cocción a sectores sociales de menores ingresos y territorios con bajos indicadores económicos, sociales y de bienestar) se han constituido en referentes ineludibles para el ajuste y actualización de la agenda de investigación y desarrollo tecnológico de GASURE.

Líneas de investigación actuales

En este contexto, están abordando investigaciones y desarrollos tecnológicos en:

La descarbonización de procesos como *driver* principal de la transición energética en la cadena de valor del hidrógeno de nulas emisiones o bajas emisiones de carbono.

La transformación de la electricidad renovable en moléculas de bajo carbono como sustitutas para los derivados del petróleo, tales como hidrógeno, metano sintético, metanol y amoníaco.

La oxidcombustión sin llama para la obtención de CO₂ biogénico para los sistemas *Power to X*, tecnología consistente en que a partir de hidrógeno de bajas emisiones y CO₂ biogénico obtener moléculas sustitutas de los combustibles convencionales.

El calor renovable, para aplicaciones de calentamiento y generación de electricidad, obtenido a partir de la combustión avanzada y eficiente de combustibles gaseosos renovables como el hidrógeno, biogás, biometano, metano sintético, amoníaco y metanol.

La complementariedad de sistemas energéticos convencionales y nuevos que se establezcan en la transición energética en condiciones de sostenibilidad y eficiencia energética y en función de los recursos existentes en cada región de Colombia.

Comportamiento de motores de combustión interna operando con combustibles gaseoso renovables. Laboratorio Móvil.

En este largo recorrido ha sido decisiva la identificación de jóvenes talentos con aptitudes para la investigación y la innovación, para sensibilizarlos para su participación activa en el grupo. Luego por la vía de la formación en posgrados o participación como investigadores en proyectos, GASURE ha visto formarse varias generaciones de profesores o investigadores universitarios, investigadores en centros de investigación nacionales, al igual que la conformación de una diáspora que realiza exitosamente actividades de I+D+I en Universidades y Centros de investigación en Estados Unidos de América, Europa y Japón, así como también exitosos ejecutivos en empresas con actividades en eficiencia energética, hidrógeno y servicios públicos.

El éxito de Gasure: la congruencia

Así como los proyectos con Haceb y con EPM cerraron el ciclo investigación-innovación, debe destacarse que el grupo GASURE cumple, como pocos, con la congruencia de los cinco aspectos que definen el éxito de un grupo de investigación:

Un líder con conocimiento no solo académico sino también del contexto, comprometido con los desarrollos que propone, con la formación de talentos y con la respuesta a las necesidades sociales.

Una agenda de trabajo minuciosamente diseñada para irse amoldando, mediante la formación académica de sus integrantes, a las crecientes necesidades del medio externo, no solo en el aspecto social sino en el industrial, con preguntas claras y métodos decantados.

Un grupo de investigadores solidario con los conocimientos necesarios para enfrentar los retos de los proyectos de investigación.

Una relación institucional sólida entre el Grupo y la Universidad, que permite fluidez en el desarrollo de las propuestas.

Una relación exitosa con los interlocutores que son usuarios externos a la vez exigentes y rigurosos quienes han compartido los problemas a resolver y han valorado los resultados obtenidos. ✕

Del sol y el viento al hidrógeno verde y metano sintético

Andrés A. Amell Arrieta

Ingeniero mecánico y magíster en Economía
de La Energía y Los Recursos Naturales
andres.amell@udea.edu.co

Camilo Echeverri-Urbe

Ingeniero mecánico y magíster en Ingeniería
camilo.echeverriu@udea.edu.co

Hidrógeno verde, gris, azul, negro, rosa, blanco. Esta paleta de colores que se le ha asignado a las formas de producir energía no se trata de un color de la materia sino de una convención para indicar los modos de su producción.

Verde para el hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovables; gris para el producido a partir de gas natural mediante un proceso llamado reformado de vapor, que libera dióxido de carbono que contribuye al calentamiento global; azul para el que también se obtiene del gas natural pero con la diferencia de que se captura y almacena el dióxido de carbono generado en el proceso para reducir su impacto ambiental; marrón para el hidrógeno que se produce a partir del carbón con captura y almacenamiento del dióxido de carbono;

rosa para el hidrógeno producido a partir de la electrólisis del agua y que utiliza energía nuclear; y blanco para el hidrógeno que se genera naturalmente en el subsuelo por la interacción del agua con las rocas y a través de otro tipo de reacciones químicas.

De este espectro es posible generar hidrógeno verde a partir del sol y el viento. Esta tecnología fue instalada por el grupo Ciencia y Tecnologías del Gas y Uso Racional de la Energía —GASURE— de la Universidad de Antioquia junto con el grupo Desarrollo de Estudios y Tecnologías Ambientales del Carbono —DESTACAR— de la Universidad de La Guajira. Esta tecnología es conocida como *power-to-gas*, y es la primera planta piloto en Colombia y Latinoamérica en la que se produce hidrógeno verde y metano sintético. Está ubicada en La Guajira, el departamento de Colombia donde se tienen las mejores condiciones de radiación solar y vientos para la producción de energía renovable.

Producción de bajo impacto ambiental









Microplanta solar en la Universidad de la Guajira de un sistema *power-to-gas*. Fotografía: Cortesía del grupo de investigación.

El hidrógeno verde no es sino el hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovable como la solar o la eólica y el color de su convención hace referencia a que la producción de este hidrógeno



POWER-TO-GAS

Sistemas de almacenamiento de energía

		
	Tiempo que demora en descargarse	Capacidad de almacenamiento de energía
VOLANTE DE INERCIA 	0-45 MINUTOS	1-100 KWh
BATERÍAS 	2 MINUTOS - 12 HORAS	5 KWh - 10 MWh
AIRE COMPRIMIDO 	2 HORAS - 15 DÍAS	5 MWh - 1 GWh
ALMACENAMIENTO POR BOMBEO 	1 DÍA - 26 DÍAS	100 MWh - 10 GWh
HIDRÓGENO (POWER-TO-GAS) 	1 HORA - 1 MES	1 GWh - 10 TWh
METANO (POWER-TO-GAS) 	3 HORAS - 1 AÑO	35 GWh - 8 TWh



Un hogar colombiano, en promedio, consume 157 kWh en un mes o lo que es lo mismo 5,23 kWh en un día. Fuente: UPME.

PLANTA

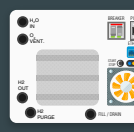
Planta piloto *power-to-gas* (PtG) para la producción de hidrógeno de bajas emisiones y metano sintético.



Microplanta eólico-solar 15 kW:
 - 10 kW fotovoltaicos.
 - 5 kW eólicos.



Inversor para el sistema eólico.
 Microinversores para el sistema fotovoltaico (solar).



HIDRÓGENO VERDE



Electrólisis con electricidad proveniente de energías renovables

HIDRÓGENO BLANCO



Hidrógeno que se genera naturalmente

EMISIONES

Tecnología para la producción de hidrógeno

GAS

HIDRÓGENO ROSA



electrólisis con
energía procedente de
central nuclear

HIDRÓGENO AZUL



Reformado de gas natural con
Captura, Uso y Almacenamiento de
Carbono (CCUS, por sus siglas en
inglés) también aplica para
gasificación del carbón
con CCUS.

ASOCIADAS DE CO₂

tecnologías de
producción de
hidrógeno (H₂)

HIDRÓGENO GRIS



Reformado de gas
natural sin CCUS

HIDRÓGENO MARRÓN

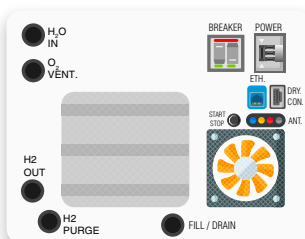


Gasificación del
carbón con CCUS

Esta tecnología permite almacenar
grandes cantidades de energía por
largos periodos de tiempo comparada
con otras tecnologías de
almacenamiento de energía.

El metano obtenido por **power-to-gas**
puede utilizar la infraestructura existente
del gas natural para su transporte,
distribución, usos finales y exportación
en forma de metano líquido.

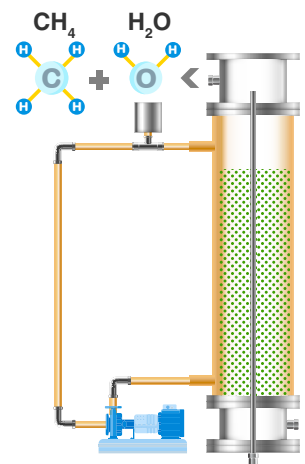
ELECTRÓLISIS



**Proceso que utiliza
electricidad para dividir
el agua (H₂O) en sus
elementos básicos:**

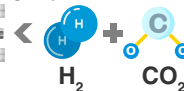
hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).
Este proceso se hace en un
electrolizador que puede ser:
Alcalino (AEL), Membrana de
Intercambio de Protones
(PEM), Óxido Sólido (SOEC),
y Membrana de Intercambio
de Aniones (AEM).

METANACIÓN



Proceso químico en un
reactor que convierte
hidrógeno (H₂) y dióxido de
carbono (CO₂) en metano
(CH₄), el principal
componente del gas
natural. Esto se da gracias
a un catalizador y la
reacción de Sabatier:
 $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

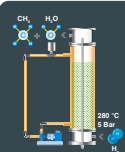
280 °C
5 Bar



Producción de
hidrógeno con
electrolizador AEM,
generando 1 m³/h a
30 bar.



Tanque
pulmón/almacenamiento
de H₂ de 100 L a 30 bar.



Producción de
metano sintético en
reactor de metanación
con una conversión
de CO₂ del 92 %.



Sistema de combustión
de hidrógeno.

tiene bajo impacto ambiental en relación con otros métodos como, por ejemplo, el hidrógeno gris en donde el hidrógeno es producido a partir de gas natural sin capturar de dióxido de carbono, lo que significa que puede tener un impacto ambiental más alto. Cuando se realiza un proceso de combustión con alto contenido de aire, la llama del hidrógeno sería invisible al ojo humano; en otros casos, tendría un color rojizo, pero este se atribuye a impurezas en el aire o al arrastre de partículas en las tuberías del hidrógeno que al estar a altas temperaturas generan el color rojizo. Teniendo en cuenta lo anterior, ya queda claro que no se trata de que el hidrógeno tenga un color, sino que es una convención estandarizada a nivel internacional para hablar de sus modos de producción.

Electrolizador AEM de un sistema *power-to-gas*.

Fotografía: Cortesía del grupo de investigación.

Power-to-gas es una tecnología que convierte energía eléctrica, especialmente la generada por fuentes renovables como el sol y el viento, en gas (energía química), principalmente hidrógeno (verde) o metano sintético. Este último se genera a través de un reactor que usa un catalizador y los gases de hidrógeno y dióxido de carbono. El propósito de esta tecnología radica en aprovechar los excesos de electricidad producida por paneles solares o turbinas eólicas en un día soleado o ventoso para almacenarla en forma de gas y usarla en el momento que se requiera. Es aquí donde surge el interés en esta tecnología, ya que existen diferentes tecnologías para el almacenamiento de energía, pero el *power-to-gas* se presenta como la de mejor capacidad de almacenamiento y tiempo de descarga, es decir, el tiempo en que el dispositivo se queda sin energía almacenada.

La instalación y los rendimientos

En el proyecto se instalaron paneles fotovoltaicos para la generación de 10 kW de energía y un aerogenerador con capacidad de generar hasta 5 kW, por lo que la planta piloto es de 15 kW eléctricos. Hasta este punto se tiene la generación de energía, pero ¿y el hidrógeno? Este se produce a través de una tecnología conocida como electrólisis del agua, que consiste en dividir el agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) utilizando electricidad, por medio de un equipo conocido como electrolizador, que puede ser de diferentes tipos; para el proyecto ejecutado, es del tipo Membrana de Intercambio Aniónico (AEM, por sus siglas en inglés).



Hasta aquí hemos producido hidrógeno verde, pero ahora, si mezclamos el hidrógeno verde con dióxido de carbono y lo hacemos pasar por lo que se conoce como un reactor de metanación, que, gracias a una reacción química, produce agua y metano que, como no fue producido a través de combustibles fósiles, es conocido como metano sintético. Su importancia radica en que, por un lado, al ser casi idéntico al gas natural, se puede usar la infraestructura de tuberías ya existente y usarse en equipos ya instalados, lo que evita grandes inversiones. Y por otro lado, al producirse utilizando CO₂, se convierte en una herramienta importante para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que avanza hacia la meta de carbono neutro.

Algunos retos de este proyecto fueron las revisiones normativas en relación con el uso, almacenamiento y distribución del hidrógeno. Al tratarse de un combustible, la seguridad es un aspecto fundamental a tener en cuenta, y no se debe escatimar en esfuerzos en este aspecto. Asimismo, el diseño y fabricación de un quemador que puede operar con 100 % de hidrógeno fue otro de los aspectos que hicieron que este proyecto fuera retador. Como se mencionó anteriormente, en este caso, como se puede ver en el video, con el hidrógeno no se observa una llama, pero al acercar un objeto se ve cómo este se empieza a quemar.

Escanea el código QR para ver un video de combustión del hidrógeno



Turbina eólica de un sistema Power to gas en la Universidad de la Guajira. Fotografía: Cortesía del grupo de investigación.



El reto final fue el diseño del reactor de metanación para la producción del metano sintético, un sistema que requirió de análisis teóricos, de simulaciones numéricas y de experimentos previos para obtener la información necesaria que permitiera diseñar y fabricar el prototipo final del reactor. El prototipo construido e instalado en la planta piloto puede obtener conversión del CO₂ de hasta el 92 %, es decir, casi todo el dióxido de carbono reaccionó para producir metano sintético, un buen resultado para ser el primer proyecto de este tipo instalado en Latinoamérica.

El *power-to-gas* es una forma inteligente de almacenar la energía excedente de fuentes renovables en forma de gas, que luego puede ser utilizado como combustible o como fuente para la producción de energía eléctrica cuando no haya sol o viento. **X**

Glosario

Aerogenerador: Dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Consiste en una torre con hélices que giran cuando el viento sopla, lo que activa un generador que produce electricidad.

Panel fotovoltaico: Dispositivo que convierte la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Está compuesto por células

solares que generan corriente continua cuando son expuestas a la luz.

Electrolizador: Equipo que utiliza electricidad para descomponer agua en hidrógeno y oxígeno a través de un proceso de electrólisis. Es fundamental para la producción de hidrógeno verde cuando la electricidad proviene de fuentes renovables.

Metanación: Proceso químico en el que se produce metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono. Este proceso se utiliza para almacenar energía renovable en forma de gas, lo que contribuye a la descarbonización y a la economía circular.

Nombre del proyecto: Desarrollo de un sistema *power-to-gas* (PTG) en el contexto de las fuentes de energía renovables y convencionales disponible en La Guajira. Convocatoria: 792-2017 2ª CONVOCATORIA ECOSISTEMA CIENTÍFICO PARA LA FINANCIACIÓN DE PROGRAMAS DE I+D+i

Nombre del programa: Alianza para la sostenibilidad energética de los sectores industrial y de transporte colombiano mediante el aprovechamiento de recursos renovables regionales - SÉNECA. **Equipo de trabajo:** Universidad de Antioquia - GASURE: Andrés A. Amell Arrieta, Camilo Echeverri Uribe, Andrés F. Colorado, Cristian Camilo Mejía Botero, Juan Esteban Ferrer Ruiz, Diana Carolina Rodríguez Henao, Alejandro Restrepo Román, Mateo Viana Cadavid. Universidad de La Guajira - DESTACAR: Marlon Bastidas Barranco, Darío Serrano Flórez, Carlos Vides Prado, Jhon Jairo Ditta Granados, Yeltsin Monroy Estrada.

De las coníferas al mirtanal: procesos mejorados de una síntesis sostenible

Lisbeth Tatiana Castro-Lugo

Estudiante de Ingeniería Química
Universidad de Antioquia
lisbeth.castro@udea.edu.co

Edwin Alexis Alarcón

Ingeniero Químico y doctor en Ciencias Químicas
edwin.alarcon@udea.edu.co

Luis Alfonso Gallego Villada

Ingeniero Químico, magíster en
Ingeniería y doctor en Ingeniería
Química
alfonso.gallego@udea.edu.co

Grupo de Investigación Catálisis
Ambiental, Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia

El aroma de las coníferas guarda una gran riqueza bioquímica. Estas plantas albergan compuestos con aplicaciones en cosmética, salud y otras industrias en las que hoy la química avanza en el desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles para extraer y sintetizar aceites esenciales.

Fotografía: Freepik.es



El universo de plantas que despiden aromas como un indicador de la presencia de ciertos compuestos que podrían poseer propiedades terapéuticas, aromáticas o industriales hace parte del objeto de estudio de un subcampo de la química: la fitoquímica, rama que estudia los compuestos químicos de las plantas. La fitoquímica se interesa en encontrar estas sustancias en el eucalipto, el romero, la cáscara de las naranjas, los tallos y semillas de los pinos, el enebro y otras más de 200 especies que es posible hallar en Colombia para la extracción de líquidos esenciales y la búsqueda de compuestos químicos promisorios en las industrias farmacéutica, cosmética, sanitaria y alimentaria.

La búsqueda de terpenos —nombre que en función de su estructura química les damos a los compuestos que tienen la propiedad de evaporarse fácilmente y estar implicados, por ejemplo, en la producción de fragancias— en las plantas aromáticas hace parte de una de las áreas de investigación más fértiles de la química de la síntesis orgánica por su utilidad para diversas industrias y su rol en el logro de procesos ambientalmente limpios. El método es la extracción de aceites esenciales: líquidos presentes en diversas partes

de las plantas, como las flores, las hojas, las raíces, las cortezas o los frutos, que concentran tanto el aroma como las propiedades naturales de la especie. Estos aceites son de gran interés, por ejemplo, por sus propiedades terapéuticas al mostrar efectos antiinflamatorios, antimicrobianos y ansiolíticos. A nivel industrial se utilizan en la elaboración de cosméticos, perfumes, alimentos y productos de limpieza, lo que ha incrementado su demanda y, con ello, la necesidad de desarrollar métodos de extracción sostenibles.

Desafíos experimentales para una extracción más limpia

La obtención de los aceites esenciales enfrenta diversos desafíos experimentales tanto en la producción como en la estandarización de las sustancias que varían según la planta de origen, el método de extracción y el uso final del aceite esencial. Uno de los principales retos en esta serie de pasos es la variabilidad en la composición química —es decir, en la cantidad y calidad de los compuestos clave—, pues depende de factores ambientales como el clima, la altitud, el tipo de suelo en el que se cultiva la planta, la genética de la planta y los métodos de cultivo y el uso de pesticidas.

Una sustancia llamada beta-pineno o β -pineno, presente en los tallos, hojas y resinas de materias primas comunes de especies de coníferas como los pinos y los abetos (también presente en los aceites esenciales extraídos de plantas aromáticas como el romero, la salvia, y el eucalipto) tiene el potencial de transformarse en compuestos de alto valor comercial mediante procesos químicos controlados y mejorados.

Por eso, otro reto adicional en este proceso es el de la optimización de los métodos de extracción. En general, los aceites esenciales se extraen mediante destilación al vapor, un proceso en el que se hace pasar vapor de agua caliente a través de las plantas para arrastrar los aceites. El vapor se enfría, los aceites se condensan en un líquido y, posteriormente, se separa el aceite esencial puro del agua. Sin embargo, este proceso presenta distintos niveles de eficiencia, por lo que optimizarlo para maximizar la obtención de β -pineno sin comprometer las propiedades del aceite continúa siendo un reto importante. Por último, la escalabilidad, la estandarización y el control de calidad son otros desafíos que cobran relevancia a medida que crece la demanda de estos productos.

La obtención de un compuesto a partir de coníferas

El grupo Catálisis Ambiental de la Universidad de Antioquia investigó la obtención de mirtanal, un compuesto de alto valor comercial que se obtiene del β -pineno. Este compuesto ha despertado interés tanto en las ciencias químicas como en la industria debido a su aroma fresco similar al del limón y el mirto o arrayán y a sus propiedades químicas y volatilidad en condiciones ambientales. El último es un atributo llamativo para la industria de fragancias. Además, el mirtanal es empleado en la industria de alimentos como saborizante cítrico ideal para alimentos y bebidas. Aunque aún se están realizando investigaciones, algunos estudios sugieren que podría tener aplicaciones medicinales debido a su actividad antimicrobiana y antiinflamatoria.





Para obtener mirtanal desde el β -pineno, primero se realiza una reacción química en la que ocurre un proceso de oxidación del β -pineno para obtener el epóxido de β -pineno y luego se lleva a cabo la isomerización. La oxidación puede definirse como el proceso en el que una molécula pierde electrones, mientras que la isomerización implica una reorganización de los átomos dentro de la molécula. Tradicionalmente, este proceso se lleva a cabo en dos etapas independientes: primero, el β -pineno se oxida en un reactor para obtener el epóxido, que luego se somete a un proceso de purificación. Luego, el epóxido purificado sufre una reorganización estructural en otro reactor, produciendo mirtanal como el principal producto. Sin embargo, este método genera una gran cantidad de residuos debido a los procesos intermedios requeridos.

Procesos mejorados de síntesis

En 2011, una patente propuso la producción de mirtanal a partir del epóxido de β -pineno puro. No obstante, nuestra investigación se enfoca en la obtención eficiente de mirtanal directamente del β -pineno mediante una reacción *one-pot* —que implica que toda la secuencia de transformaciones químicas, en este caso la epoxidación y la isomerización, ocurra en un solo recipiente— y utilizando catalizadores heterogéneos —llamados así por estar en una fase distinta (sólido) a la de los reactivos (líquidos) que ayudan a transformar—.

Aquí está el núcleo de nuestro aporte: usar una mezcla de catalizadores sólidos, polvillos compuestos de hierro o estaño con óxido de magnesio, que presentaron una valiosa función: ser reutilizados

Comparación del tiempo en las reacciones

Sin catalizador	Con catalizador
 1 día	 30 minutos 1 hora
 30 días	

Reacción observada mediante el cambio de color con el tiempo. Se resalta la importancia de los catalizadores, pues optimizan las reacciones.

una vez cumplieron su trabajo de transformación, pues, al estar en una fase distinta al resto de la mezcla, se pudieron recuperar fácilmente y reutilizarse sin perder significativamente su efectividad. Los resultados más relevantes en este punto se obtuvieron con catalizadores de hierro sobre un soporte llamado SBA-15: se alcanzó rendimientos del mirtanal de entre 59 y 62,3 % después de 48 horas a unos 50 °C (normalmente estos procesos requerirían de temperaturas mucho más elevadas).

Una reacción con menos residuos es más sostenible

Este tipo de transformaciones químicas adquiere gran relevancia en la investigación de procesos ambientales responsables ya que, al realizarse en un solo reactor, generan menos residuos al evitar etapas intermedias de purificación y separación. Además, se redujo el consumo de energía utilizando un único reactor durante todo el pro-

ceso. Otro de los desarrollos clave del grupo de investigación en esta ruta fue el de preparar un sistema con catalizadores heterogéneos selectivos hacia el mirtanal y lograr una serie de pasos ambientalmente más sostenible. Se obtuvieron altos rendimientos del producto de interés sin etapas intermedias, lo que resultó en una menor generación de residuos en comparación con los procesos tradicionales para un producto químico de alto valor comercial, debido a su aroma y sus potenciales propiedades antiinflamatorias y antibacterianas. ✕

Glosario

Aceite esencial: Mezcla de sustancias aromáticas responsable de la fragancia de las flores cuya extracción se lleva a cabo mediante arrastre en corriente de vapor de agua o por expresión del pericarpio en el caso de los cítricos.

Monoterpeno: Un tipo de molécula natural que forma parte de los aceites esenciales de muchas plantas y tiene aromas intensos, como los de la menta, el pino o los cítricos.

Epóxido: Molécula con un anillo pequeño en su estructura química que incluye oxígeno, lo que la hace muy reactiva y útil en la fabricación de plásticos y químicos.

Material mesoporoso: Material que presenta un tamaño de poro de entre 2 y 50 nanómetros.

Catalizador heterogéneo: Sustancia que, generalmente, acelera la velocidad de reacción y se encuentra en una fase diferente a la fase en la que ocurre la reacción.

Este texto se deriva del proyecto de investigación Transformación de monoterpenos mediante reacciones *one Pot* sobre catalizadores heterogéneos (PRG2022-53000), desarrollado desde el año 2023 por el grupo de investigación Catálisis Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.



Cafeína para descontaminar combustibles

Luz Marina Ocampo Carmona

Ingeniera química y Ph. D. en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales
Directora del Grupo de Ciencia y Tecnología de Materiales de la
Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín
lmocampo@unal.edu.co

Juan Fernando Espinal

Químico y Ph. D. en Ciencias Químicas
juan.espinal@udea.edu.co

Una alternativa para limpiar el azufre presente en el combustible líquido podría estar en compuestos promisorios en la descontaminación como la cafeína. El desarrollo de solventes basados en cafeína mostró que puede funcionar a menor temperatura, ser menos tóxicos y menos costosos que los procesos actuales de remoción de azufre.

Cada vez que un auto se enciende, se libera en la atmósfera dióxido de azufre proveniente de los combustibles fósiles.

Otros sectores industriales también emiten este gas que hace parte de los que se convierten en lluvia ácida cuando se mezcla con el agua atmosférica, lo que tiene impactos amplios en el ambiente: daños en cultivos, bosques y especies acuáticas, así como acidificación de los océanos; en la salud humana: enfermedades como el cáncer, el asma y otras enfermedades respiratorias y cardíacas; y en la industria: problemas de corrosión en las infraestructuras metálicas, además de afección del rendimiento y la eficiencia de los motores y la maquinaria.

Debido a lo anterior, varios gobiernos han fijado políticas de reducción del contenido de azufre en combustibles derivados del petróleo apuntando a límites cada vez más pequeños, una apuesta que se une a la gran preocupación por el desarrollo de energías alternativas a los hidrocarburos y combustibles derivados del petróleo.

El azufre: perjudicial en los combustibles líquidos

El azufre es un elemento abundante en la corteza terrestre. Es un componente natural de la

materia vegetal y animal. En su forma natural se puede encontrar en las cercanías a zonas volcánicas y aguas termales, donde se puede percibir olores desagradables provenientes de la presencia de este elemento. A partir de la materia vegetal y animal de la que se forma el petróleo crudo, teniendo en cuenta que este proceso ocurre bajo tierra, los elementos presentes en el material de partida estarán presentes en el crudo y sus derivados como la gasolina y el diésel.

Los hidrocarburos son compuestos formados principalmente por carbono e hidrógeno y pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y oxígeno, entre otros elementos. Luego de su extracción, el petróleo se lleva a una refinería (planta química industrial donde se procesa el petróleo) para obtener productos comercializables de mayor utilidad, como los combustibles líquidos, entre los que están la gasolina y el diésel. Pero, además, el azufre se usa en gran cantidad de procesos industriales como la producción de ácido sulfúrico para baterías, la fabricación de pólvora y la industria del caucho.

El método más utilizado para la eliminación de compuestos azufrados en los combustibles fósiles

La industria petrolera ha respondido con la hidrodesulfuración (HDS), uno de los métodos más utilizados, en el que el hidrógeno reacciona con los hidrocarburos conminados con azufre para eliminar el ácido sulfhídrico (H_2S) y obtener así combustibles con menos azufre. Pero este proceso requiere condiciones extremas: altas temperaturas, presiones elevadas, catalizadores de costos elevados y un consumo energético industrial de hidrógeno considerable. Además, el H_2S producido debe eliminarse porque inhibe las reacciones y destruye el catalizador. Este método, aunque efectivo, se aleja del enfoque de sostenibilidad que es cada vez más necesario en el escenario actual del consumo de combustibles fósiles.

Una alternativa en la cafeína

En la cafeína podría estar una parte de la solución. Investigadores de la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín y la Universidad de Antioquia han probado que con este compuesto se pueden desarrollar solventes verdes para remover azufre de los combustibles. La cafeína, presente en los granos de café y las hojas del té y del cacao, es un alcaloide considerado como la sustancia farmacológica ingerida con más frecuencia en el mundo debido a su uso para la elaboración de medicamentos para tratar el dolor de cabeza y como estimulante de venta libre.

Su estructura química es similar al imidazol, un compuesto químico ampliamente utilizado en medicamentos antimicóticos y usualmente empleado en procesos de desulfuración. La ventaja de usar la cafeína en dicho proceso es que puede reducir los costos en la reacción que, además, es menos tóxica y más biocompatible y sostenible.

Solventes naturales: una alternativa para la eliminación de compuestos azufrados

En los últimos años, el campo de la química verde o química sostenible ha ganado gran relevancia debido a la necesidad de desarrollar procesos industriales más sostenibles y respetuosos con el ambiente. Ésta se fundamenta en 12 principios.

Desde el año 2001 se ha buscado implementar el uso de solventes alternativos verdes para abordar los desafíos que enfrentan los métodos de HDS. Entre ellos están los líquidos iónicos (LIs) y los solventes eutécticos profundos (SEPs).

Los LIs tienen una estructura compuesta por un catión (ion con carga positiva) orgánico (sustancia que tiene como principal componente el carbono y hace parte de los seres vivos) y un anión (ion con carga negativa) inorgánico (sustancia que no tiene como componente al carbono, entre ellos los minerales) poliatómico. Los LIs basados en imidazol (compuestos orgánicos muy utilizados en medicamentos para el tratamiento de hongos) han mostrado una gran capacidad en los procesos de desulfuración de combustibles líquidos, pero presentan como desventajas su toxicidad y los altos costos de producción, lo que ha limitado su aplicación a escala industrial. Por su parte, los SEPs se pueden definir como una mezcla de dos o más sustancias químicas conocidas como aceptores y donantes de enlaces de hidrógeno que, al combinarse en una proporción particular, se vuelven líquidos a temperaturas menores a 100 °C.

Solventes basados en cafeína para la eliminación de compuestos azufrados presentes en los combustibles

Como una alternativa a los líquidos iónicos base imidazol, se exploró en la tesis de Maestría Síntesis de solventes alternativos (líquidos iónicos y solventes eutécticos profundos) base cafeína protonada con potencial aplicación para la desulfuración de combustibles, desarrollada en el Grupo de Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad

Principios promovidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por su siglas en inglés).

Los 12 principios de la química verde

Para el diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso de sustancias peligrosas

-  **1 Prevenir** la creación de residuos
-  **2 Maximizar** la economía química
-  **3 Síntesis química** menos peligrosa
-  **4 Diseñar** productos y compuestos menos peligrosos
-  **5 Utilizar** disolventes y condiciones seguras de reacción
-  **6 Diseñar** para la eficiencia energética
-  **7 Utilizar** materias primas renovables
-  **8 Evitar** derivados químicos
-  **9 Utilizar** catalizadores
-  **10 Diseñar** productos fácilmente degradables
-  **11 Monitorear** los procesos químicos en tiempo real
-  **12 Prevenir** accidentes

Nacional de Colombia - sede Medellín, el uso de la cafeína en lugar de imidazol para desarrollar líquidos iónicos y solventes eutécticos profundos que permitieran la remoción de compuestos azufrados, ya que presentan estructuras químicas similares, además de que el costo de la cafeína es mucho menor que el imidazol.

Los LIs y SEPs basados en cafeína presentan como ventajas frente a los procesos de HDS el trabajar a temperaturas menores a 100 °C, una muy baja volatilidad, poca toxicidad (muchos de ellos se extraen de compuestos naturales, en este caso del café), biocompatibilidad, entre otras propiedades. Se destaca que la síntesis de los LIs y SEPs basados en cafeína ha sido poco investigada. Sus aplicaciones se han centrado en el campo de la catálisis y la electroquímica. Debido a lo anterior, el interés de la tesis fue evaluar una alternativa ambientalmente más sostenible en el campo de la extracción de compuestos azufrados como los LIs y SEPs base cafeína. La similitud entre la estructura química del imidazol y la cafeína permite que la cafeína pueda ser utilizada para el desarrollo de compuestos más amigables con el ambiente que con el imidazol.

El proceso de síntesis

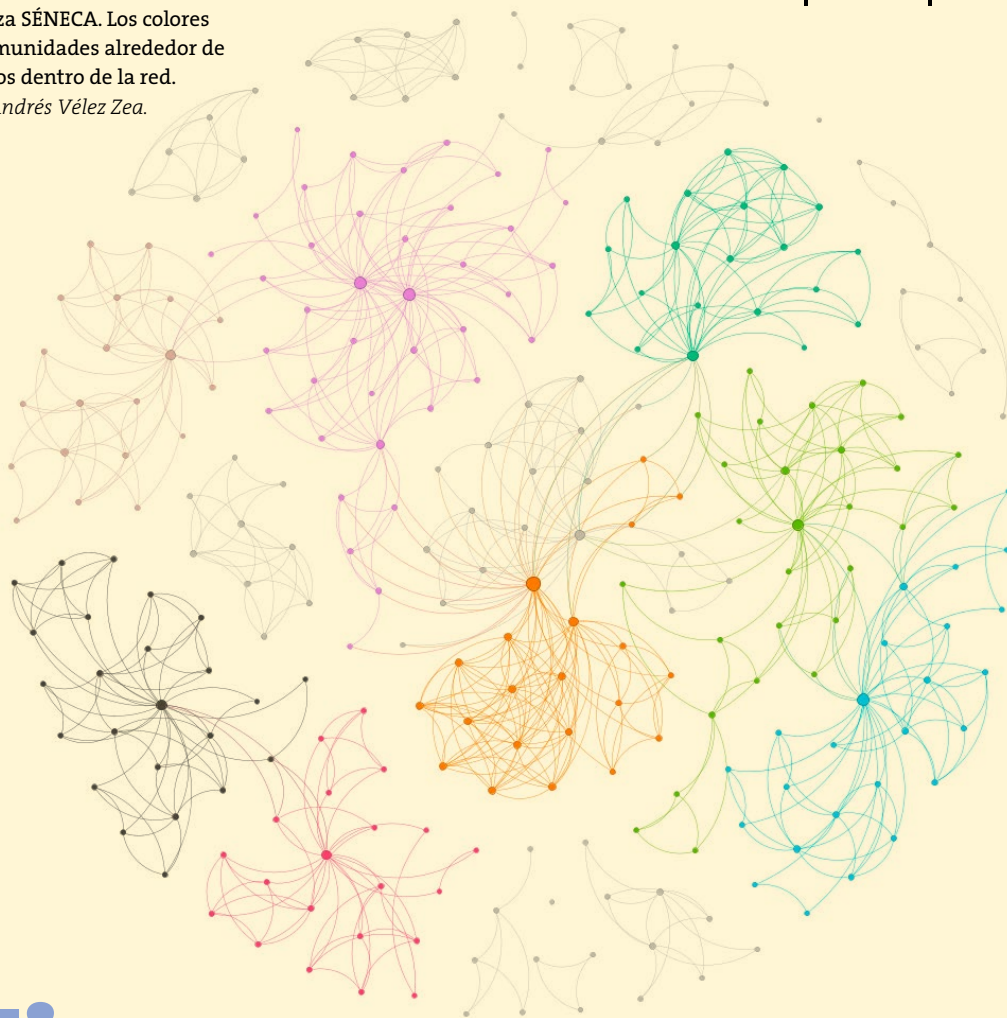
Primero, los investigadores modificaron cafeína mediante un proceso de protonación que consiste en añadir un ion H^+ para crear una sal llamada clorhidrato de cafeína (CafCl). Luego eligieron compuestos que, al reaccionar con esta sal de cafeína, tuvieran afinidad con los compuestos azufrados presentes en los combustibles.

En el caso del LI, se sintetizó el IL compuesto por $CafCl:FeCl_3 \cdot 6H_2O$ para confirmar la formación del anión tetracloroferrato ($FeCl_4^-$). De otro lado, se sintetizaron SEPs ternarios utilizando etilenglicol (EG) como donantes de enlaces de hidrógeno y CafCl y $ZnCl_2$ como aceptores de enlaces de hidrógeno, obteniendo dos SEPs ($ZnCl_2:EG:CafCl$). Se evaluó así la capacidad extractiva de los LIs y SEP en la desulfuración de un combustible al variar la temperatura, la relación LI/SEP y la cantidad de CafCl. El LI logró un porcentaje máximo de desulfuración de 12,9 %, mientras que el DES alcanzó un 17,44 %.

El desarrollo de solventes verdes basados en cafeína significó un gran reto para todo el equipo interdisciplinario de estudiantes, docentes y grupos de investigación. ✖

Este texto se deriva del proyecto «Desarrollo de líquidos iónicos a base de cafeína para la desulfuración de combustibles», financiado por el grupo de universidades que conforman el G8 y Ruta N, desarrollado por un equipo interdisciplinario de estudiantes, docentes y grupos de investigación: Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente de la Universidad de Antioquia y Materiales Avanzados y Energía de la Institución Universitaria ITM; entre los años 2022 y 2024.

Representación de los actores en la red científica Alianza SÉNECA. Los colores representan comunidades alrededor de temas específicos dentro de la red.
Imagen: Jaime Andrés Vélez Zea.



Alianza SÉNECA: redes vivas del ecosistema científico

Jaime Andrés Vélez Zea

Ingeniero mecánico

jaime.velezz@udea.edu.co

Grupo de Investigación en Tecnologías Aplicadas
de la Universidad de Antioquia

—GITA—

Anteriormente, los bosques se veían como conjuntos de seres independientes que competían por recursos. Sin embargo, hoy entendemos que son redes complejas de interacciones que permiten sistemas de soporte mutuo, alarma temprana y división de nutrientes. Estas interacciones ocultas son cruciales para mantener la salud del ecosistema. De manera similar, el conocimiento científico también depende de una red de conexiones explícitas e implícitas para prosperar.



El conocimiento científico, similar a un bosque, depende de una infinidad de conexiones visibles e invisibles para sostener su crecimiento y supervivencia. Las redes científicas se forman de lazos que, al unir investigadores, instituciones y proyectos, forman un entramado esencial para la creación y difusión del conocimiento.

En el árbol de la ciencia, los frutos más celebrados son a menudo los resultados visibles: artículos, patentes o presentaciones en congresos. Sin embargo, éstos son apenas la punta del iceberg del esfuerzo investigativo de toda una estructura de relaciones entre personas, grupos e instituciones a través de la cual fluyen los recursos económicos y capacidades intelectuales que hacen posible el desarrollo científico. A esta reunión de elementos se la ha llamado «ecosistema científico».

A pesar de su importancia, estas estructuras de relacionamiento suelen pasar desapercibidas e indocumentadas, lo que lleva a que, una vez que se concluyen los proyectos que las originaron, se diluyan estas relaciones de colaboración y, con ello, aumente el riesgo de que se pierdan estas redes, con la enorme dificultad de que no pueden ser reconstruidas en proyectos futuros.

La Alianza SÉNECA: un «ecosistema científico»

La Alianza SÉNECA se creó como un ecosistema científico y tecnológico en Colombia, formalizada en 2018 para maximizar las oportunidades en el sector energético del país. Este proyecto, que integró veintiocho instituciones entre universidades, sector público y privado, así como diez departamentos del país, es un ejemplo práctico de cómo las redes científicas pueden ser utilizadas para impulsar el desarrollo en áreas críticas. El Grupo de Investigación en Tecnologías Aplicadas —GITA— de la Universidad de Antioquia participó en la caracterización de SÉNECA como parte de la iniciativa de gobernanza del componente de fortalecimiento institucional (FI) del ecosistema. La Alianza reunió a investigadores, instituciones y proyectos de diferentes disciplinas a través de un entorno colaborativo. Esta red tuvo como peculiaridad que desde el principio se declaró como un «ecosistema científico» que acogía los siguientes principios:

- El carácter sistemático del proyecto: un continuo de investigadores, recursos e instituciones con un fin común.

- La estructura del proyecto es, por necesidad, relacional, y los resultados esperados de este dependen de las características específicas de sus relaciones.

Un aspecto fundamental que diferenció este proyecto de otros similares es, como se dijo, su perspectiva sistemática, lo que conllevó la necesidad de desarrollar metodologías específicas de tal forma que la misma red fuera un producto de investigación. Es en este punto que el análisis de redes relacionales se suma al cuerpo de tecnologías regulatorias como las plataformas de auditoría y reportes electrónicos existentes o los sistemas de gestión de documentos y registros requeridos para el monitoreo, caracterización y verificación del cumplimiento de los objetivos del programa.

Caracterizar, ajustar, optimizar una red

Se desarrolló el Sistema de Información SÉNECA (SIS) que utiliza metodologías avanzadas como el análisis de redes, el procesamiento de lenguaje natural y los principios generales de las tec-

nologías regulatorias (automatización, eficiencia, transparencia, flexibilidad y colaboración) para diagnosticar, reportar y caracterizar las interacciones dentro del ecosistema científico. Este sistema permitió no solo identificar y visualizar las relaciones existentes, sino también amplificar y socializar los impactos de la Alianza.

La estructura inicial de la red, desde el punto de vista de sus componentes operativos, consistió en quince (15) proyectos enfocados en las áreas de la diversificación energética y las fuentes sostenibles de gas natural y eficiencia energética, además de un proyecto especial creado específicamente para las labores de reporte, caracterización y verificación conocido como el proyecto de fortalecimiento institucional. Estos proyectos abarcan cinco (5) instituciones acreditadas, seis (6) no acreditadas y ocho (8) pertenecientes al sector productivo.

El componente de FI fue entonces el encargado de clasificar, enumerar, atribuir, verificar y reportar los diferentes productos documentados por los investigadores principales de cada proyecto y responder a los compromisos con el organismo garante adquiridos por el ecosistema. La figura de FI, como parte integral de la estructura del ecosistema, desembocó en la necesidad de generar estrategias de autodiagnóstico superiores a las tradicionales de simple conteo y verificación de productos.

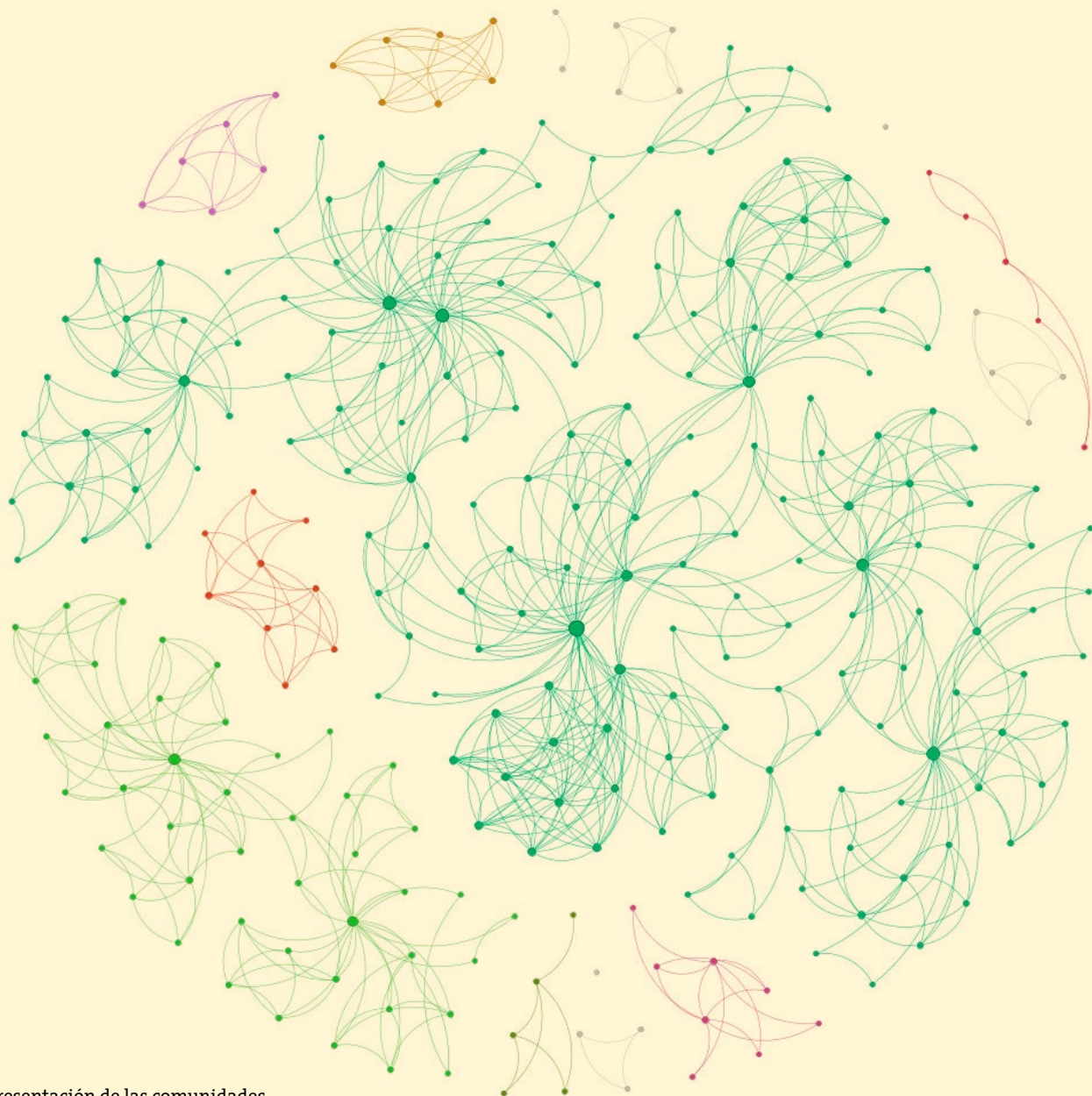
Parte fundamental de este desarrollo, consistió en el diseño e implementación de procesos de análisis de redes aplicados a las redes de coautoría de los diferentes productos científicos, lo que reveló la auténtica estructura relacional del ecosistema con sus correspondientes subredes y colegios invisibles o estructuras relacionales no explícitas en los organigramas del proyecto. Estas estructuras y subestructuras se van creando según los tiempos y las necesidades específicas de cada desarrollo científico.

La gobernanza de una red científica

Uno de los impactos no explícitos de este proceso de caracterización y catalogación de relacionamientos es la preservación de la estructura relacional, el plano de la máquina que produce la ciencia, de tal forma que, una vez caracterizadas, estas redes pueden ser «rehidratadas» con recursos específicos para poner en marcha su reactivación y continuidad más allá de los ciclos de proyectos individuales. Esta rehidratación no solo tiene el fin de preservar las conexiones y sinergias ya establecidas, sino también el de facilitar la generación de nuevas combinaciones estratégicas al unir redes preexistentes.

La reactivación de redes implica proporcionar los recursos necesarios para mantener y fortalecer las conexiones existentes; puede incluir financiamiento, acceso a infraestructura, apoyo administrativo y oportunidades de colaboración. Al invertir en la caracterización y preservación de las redes de conocimiento, se asegura que el capital social e intelectual acumulado, en vez de perderse, que continúe creciendo y produciendo beneficios a largo plazo.

Las estrategias para la sostenibilidad de las redes científicas son variadas y, aunque no necesariamente ofrecen soluciones específicas, sí permiten reducir las búsquedas de alternativas deseables. Por ejemplo: se encontró que la automatización y eficiencia en la recolección y el análisis de datos pueden reducir significativamente el tiempo y los costos asociados con los procesos de verificación y cumplimiento de obligaciones contractuales, lo que mejora la precisión y la accesibilidad de la información. Se espera que fomentar la transparencia mediante herramientas que permitan la visualización y el análisis en tiempo real de las redes científicas facilite la colaboración entre distintos actores para mejorar la toma de decisiones.

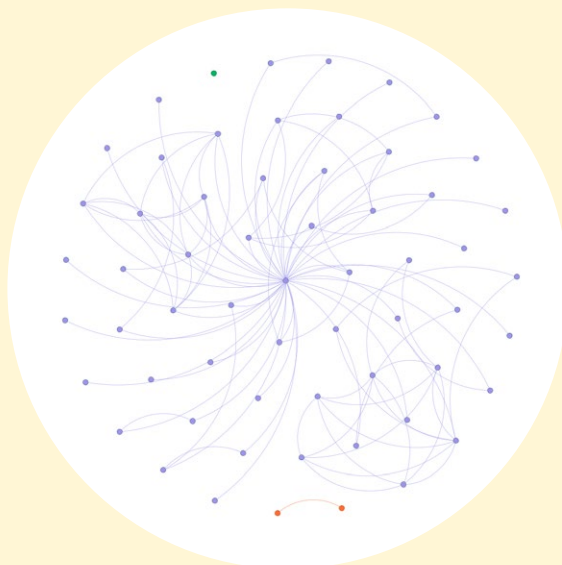


Representación de las comunidades aisladas de autores en la Alianza SENECA. Puede verse cómo algunos autores no están implicados con el grupo mayor.

Imagen: Jaime Andrés Vélez Zea.

Así se ve la red de instituciones en la Alianza SENECA.

Imagen: Jaime Andrés Vélez Zea.



Hacia la construcción de una plataforma de decisiones basadas en datos

El enfoque de SÉNECA, que integra tecnologías regulatorias, análisis de redes y procesamiento del lenguaje natural, ofrece un modelo prometededor para la gestión de ecosistemas científicos complejos. Este enfoque no solo permite una comprensión más profunda de las interacciones dentro del ecosistema, sino que también facilita la toma de decisiones informada y la optimización de recursos.

La estructura de red constituida por la Alianza SÉNECA logró que esas conexiones inadvertidas pero cruciales en el ecosistema científico dejaran de pasar desapercibidas de maneras significativas. El análisis de redes sacó a la luz colaboraciones interdisciplinarias que de otro modo habrían permanecido en la sombra, mientras que la identificación y potenciación de los «nodos clave» actuó como puente vital entre diversas áreas de investigación. Es así como lograron valorarse las contribuciones de todos los participantes, trascendiendo el reconocimiento tradicional centrado solo en los investigadores principales. Para consolidar este enfoque, se implementaron mecanismos de reconocimiento específicos para las colaboraciones más fructíferas, lo que a su vez incentivó la formación de nuevas conexiones, fortaleciendo así el tejido del ecosistema científico en su conjunto.

Mirando hacia el futuro, es crucial continuar desarrollando y refinando estas herramientas de análisis y gestión de redes científicas. Algunas áreas potenciales para futuras investigaciones incluyen:

- **La aplicación de técnicas de aprendizaje automatizado** más avanzadas para predecir patrones de colaboración e identificar oportunidades de sinergia.

- **El desarrollo de plataformas interactivas** que permitan a los investigadores visualizar y navegar por las redes de conocimiento en tiempo real.

- **La integración de métricas de impacto social y económico** para evaluar de manera más completa el valor de las colaboraciones científicas.

El análisis de redes sacó a la luz colaboraciones interdisciplinarias que de otro modo habrían permanecido en la sombra

La exploración de cómo estas herramientas pueden aplicarse a escala global para fomentar la colaboración internacional y abordar desafíos globales.

Las flores del árbol de la ciencia representan ese tejido vital de relaciones y conexiones que, aunque a menudo pasan desapercibidas, son esenciales para el crecimiento y la prosperidad del ecosistema científico.

Al reconocer y valorar estas conexiones, podemos asegurar un futuro donde la ciencia continúe floreciendo, impulsada por la fuerza de la colaboración y la innovación colectiva. ✕

Este texto hace parte del «Programa Colombia Científica» como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias «Ecosistema científico», contrato. No. FP44842- 218-2018.

«Virtualidad Edufísica»:

una guía para la formación digital

Edwin Mauricio Santa Jimenez

Licenciado en Educación Física. Magíster en Educación. Estudiante de doctorado en Educación de la Universidad de Salamanca. Docente de la Universidad de Antioquia.

edwin.santa@udea.edu.co

Cuando la pandemia de COVID-19 convirtió las pantallas en aulas, los profesores de educación física se enfrentaron a la cuestión de ¿cómo enseñar el movimiento desde el confinamiento? Así nació «Virtualidad Edufísica» como una respuesta a esta aparente contradicción.



raíz del aumento en la oferta de programas de capacitación docente en temas relacionados con la

tecnología digital, impulsado en la Universidad de Antioquia durante el periodo pandémico, un grupo de profesores del programa de Licenciatura en Educación Física se enfocó en diseñar estrategias que adaptaran estas capacitaciones a las particularidades de su disciplina, pues a diferencia de otras áreas del conocimiento, la educación física se centra en el estudio del movimiento corporal y la interacción interpersonal, aspectos que presentan retos significativos al ser trasladados a entornos virtuales, donde la mediación tecnológica limita la experiencia directa y física, esencial para su enseñanza.

En marzo de 2020, en medio de un contexto global crítico marcado por las medidas de confinamiento sanitario derivadas de la pandemia de la COVID-19, los docentes de la Universidad de Antioquia se vieron obligados a trasladar la enseñanza de sus asignaturas al entorno virtual para asegurar la continuidad de sus actividades académicas. Ante este desafío, los profesores del pregrado de Licenciatura en Educación Física se enfrentaron a una pregunta crucial: ¿cómo enseñar la motricidad desde la virtualidad, cuando su objeto de estudio, el movimiento corporal, parece intransferible a través de las pantallas?

Esta inquietud llevó a los docentes a replantear los programas de capacitación en tecnología digital, que hasta ese momento eran ofrecidos de manera general por la administración universitaria. Se propusieron adaptar dichos programas a los contenidos específicos de la educación física con el objetivo de facilitar una transición más fluida hacia la virtualidad, asegurando que las herramientas tecnológicas empleadas tuvieran una aplicabilidad efectiva en el campo, sin sacrificar los principios fundamentales de la disciplina.

Consolidación del grupo de trabajo «Virtualidad Edufísica»

Lo anterior motivó a un grupo de profesores del programa de Licenciatura en Educación Física de la Universidad de Antioquia, con experiencia en el manejo de tecnología digital, a conformar el equipo de trabajo denominado «Virtualidad Edufísica». El propósito general de este equipo sería formular un curso de formación docente enfocado en el uso de herramientas digitales aplicadas a la educación física, la motricidad y el deporte. Este curso estaba dirigido a docentes que decidieran participar de manera voluntaria, para que pudieran desarrollar las habilidades tecnológicas necesarias que les permitieran continuar con sus funciones académicas desde un formato digital, preservando tanto la calidad educativa como la esencia práctica de estas áreas.

El curso comenzó en marzo de 2021 y se desarrolló según el cronograma establecido hasta concluir en marzo de 2022. Al finalizar el curso, como docente del equipo de «Virtualidad Edufísica», decidí aprovechar esta experiencia para mi tesis doctoral en la Universidad de Salamanca. El objetivo principal fue formular una guía de formación en competencia digital destinada a los profesores del pregrado de Licenciatura en Educación Física de la Universidad de Antioquia, con el fin de asegurar la continuidad del proceso de formación docente, ahora sustentada en bases científicas sólidas.

Un paso a paso para desarrollar competencias digitales

Para la elaboración de la guía formativa propuesta en la tesis realicé un estudio cualitativo fundamentado en un modelo de estudio de caso, empleando el análisis documental y del discurso como métodos de recolección de datos. Integré los aportes derivados de las experiencias de los veintiún profesores que habían participado en las capacitaciones ofrecidas por el grupo «Virtualidad Edufísica», así como las contribuciones de los expertos más relevantes en la literatura científica sobre formación docente, educación física y competencia digital.

Una pequeña guía formativa para desarrollar competencias digitales en la educación física

01



Estructurar

un listado amplio y diverso de temas relevantes para que los profesores se motiven a abordarlos. Estos temas deben estar centrados no solamente en el uso operativo de las herramientas digitales de moda, sino también en el uso concreto que los profesores pueden hacer con aquellas herramientas, para potenciar el desempeño de sus funciones.

Esta guía presenta nueve pasos que los profesores de educación física pueden seguir para integrar la mediación tecnológica en sus clases y mejorar el proceso educativo.

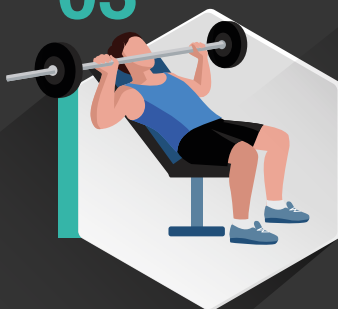
02



Identificar

las herramientas digitales comúnmente empleadas en el ámbito educativo, teniendo en cuenta las particularidades de las asignaturas que imparten los profesores. Es esencial reconocer que no todos los docentes están interesados en aprender a utilizar las mismas herramientas y que no todas estas herramientas son igualmente adecuadas para sus necesidades específicas.

03



Promover

el desarrollo de habilidades tecnológicas, tanto para el ámbito de la docencia como para el de la investigación y extensión.

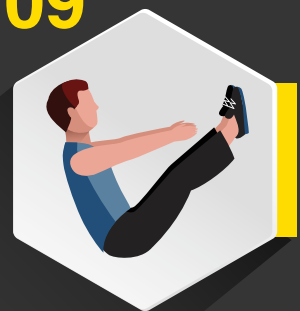
04



Designar

tutores con formación o experiencia en tecnología digital y, aún más conveniente, con acercamientos y experiencia previa en la disciplina específica, en este caso la educación física.

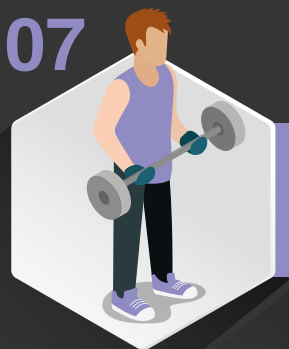
09



Evaluar

el desempeño de los profesores para asegurar la efectividad del proceso formativo.

07



Emitir

certificados de participación para reconocer el esfuerzo y la dedicación de los profesores. Esto puede servirles de estímulo para que den continuidad al proceso formativo.

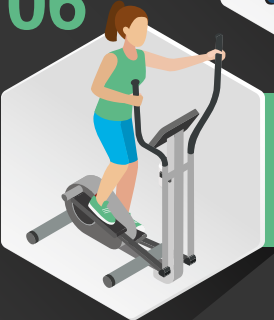
05



Permitir

que los profesores se capaciten a través de diferentes modalidades educativas para evitar la imposición de un escenario y horario concreto.

06



Categorizar

las capacitaciones según los niveles de dominio tecnológico: **básico** para aquellos profesores que se están adentrando en el reconocimiento de la tecnología digital, **intermedio** para quienes ya han desarrollado ciertos saberes y **avanzado** para quienes ya tienen un conocimiento arraigado sobre el tema en cuestión.

08



Capitalizar

los productos de las capacitaciones como objetos virtuales de aprendizaje para las asignaturas que enseñan los profesores participantes.

A modo de conclusión

Como resultado de la adopción de estas recomendaciones y de otras tantas que pudieran surgir durante el camino, se mejoraría en cierta medida la calidad de la enseñanza entre los profesores, dado que cada uno avanzaría a su propio ritmo. Por ejemplo, algunos docentes que participaron en el proceso formativo integraron herramientas como Genially para crear presentaciones interactivas sobre los contenidos propios de su disciplina y utilizaron Kahoot para evaluar los aprendizajes de sus estudiantes. Además, aprovechaban para grabar sus clases y luego compartirlas como objetos virtuales de aprendizaje (OVA) dentro de sus aulas virtuales.

Cada programa académico, tanto en la Universidad de Antioquia como en cualquier otra institución, presenta particularidades en la forma en que sus profesores integran la tecnología digital en sus prácticas educativas. Esta diversidad implica que una formación genérica para toda la planta profesoral puede no ser suficiente para abordar las necesidades específicas de cada disciplina.

En este sentido, la guía desarrollada a partir de la investigación puede ser una herramienta valiosa para docentes de diversas áreas, siempre y cuando se adapte a las particularidades de cada disciplina. Ajustar la guía a contextos específicos permitirá una capacitación más precisa y relevante, para optimizar la incorporación de la tecnología en la enseñanza y facilitar la adaptación a la globalización digital, pero con enfoque local.

Como resultado de la adopción de estas recomendaciones y de otras tantas que pudieran surgir durante el camino, se mejoraría en cierta medida la calidad de la enseñanza y se potenciaría el aprendizaje entre los profesores dado que estos avanzarían a su propio ritmo en la medida en que aportan a sus campos disciplinares.

La guía fue socializada con los docentes del pregrado en diciembre de 2024, en un momento de incertidumbre institucional que favoreció el proceso de implementación de la guía, pues permitió que muchos profesores reconsideraran su ejercicio pedagógico y reconocieran la urgencia de adaptarse a nuevas dinámicas formativas. **X**

Este texto se deriva de la tesis «Formación en competencia digital para el profesorado de educación física: Una guía para la Universidad de Antioquia», desarrollada por el estudiante del programa de doctorado en educación de la Universidad de Salamanca, Edwin Mauricio Santa Jiménez, a la luz de la tutoría de los directores Galo Sánchez y Marta Arevalo desde el año 2021.

Agradecimientos: Al docente Josué Álvarez y a la profesora Claudia Mesa, integrantes de Virtualidad Edufísica, por posibilitar los espacios de capacitación docente. A David Discher por su apoyo continuo durante esta investigación.

Los legados de la leche:

microbiota materna y política lactante

Diana C. Londoño Sierra

Nutricionista dietista y magíster en Ciencias de la Alimentación y Nutrición Humana
dcarolina.londono@udea.edu.co
Departamento de Pediatría y Puericultura,
Universidad de Antioquia

María Alejandra Buitrago Ríos

Nutricionista dietista y magíster en Políticas Públicas Alimentarias y Nutricionales
maria.buitragor@udea.edu.co

Sandra L. Restrepo Mesa

Nutricionista y magíster en Salud Colectiva
sandra.restrepo@udea.edu.co
Escuela de Nutrición y Dietética,
Universidad de Antioquia

Grupo de Investigación Alimentación y Nutrición Humana, Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia

Fotografía: Freepik.es



En las aún desconocidas e intrincadas rutas internas que conectan a las madres con sus hijos, la que traza la leche humana a través de su riqueza microbiana configura una ruta determinante en la salud infantil cuya comprensión trasciende la de un simple intercambio de nutrientes.

U

na hora después del nacimiento y durante los primeros seis meses de vida, la leche humana debe proporcionarse de manera exclusiva según lo recomienda la Organización Mundial de la Salud. No obstante, en Colombia, la calidad de la práctica de la lactancia materna continúa siendo insuficiente por razones que tienen que ver tanto con la seguridad alimentaria de las gestantes como con la cobertura limitada de una política de lactancia incompleta.

Entre 2005 y 2015, la lactancia materna exclusiva disminuyó cerca de diez puntos porcentuales —de 46,8 % a 36 %—, lo que representa un retroceso en nutrición y salud infantil así como un mayor riesgo en el aumento de enfermedades crónicas no transmisibles.

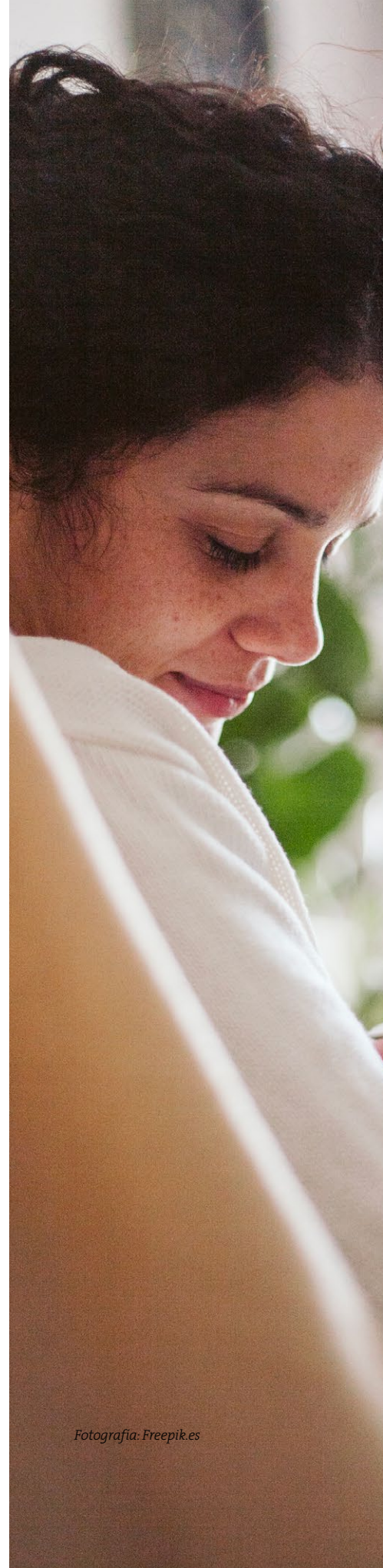
El Perfil Alimentario y Nutricional de Antioquia 2019, liderado por el componente Materno Infantil del Perfil Alimentario y Nutricional de Antioquia de la Universidad de Antioquia, en la valoración de la mujer en etapa de lactancia encontró que la lactancia materna exclusiva alcanzó 40,8 %. También documentó que el 81 % de las mujeres lactantes evaluadas tenían inseguridad alimentaria en su hogar. En cuanto a la retención de peso, entendido como el peso que mantiene la mujer después del parto, se encontró que el 27,8 % de las madres tuvo pérdida de peso y que el 22 % presentó una retención de peso superior a los 5 kg. En relación con el estado nutritivo del hierro, el 22 % presentó anemia y el 40 % deficiencia de hierro. La cantidad de hierro en la mujer condiciona su capacidad de trabajo y atención para el recién nacido. Cuando esta alteración se presenta de manera crónica, puede condicionar, además, la transferencia de hierro al recién nacido, quien lo necesita para su adecuado crecimiento y desarrollo.

Dos caras de la malnutrición: déficit y exceso en la mujer lactante

La producción de leche humana es un proceso que exige a la mujer un alto aporte de energía, incluso mayor al requerido durante la gestación. Esta condición incrementa tanto el riesgo de deficiencia de energía como una posible carencia de nutrientes, especialmente si la mujer se encuentra en situación de vulnerabilidad alimentaria y nutricional.

La evidencia científica es contundente en demostrar la relación entre la alimentación y el estado nutricional de la madre con la salud y nutrición del recién nacido al mostrar, por ejemplo, cómo el déficit de micronutrientes durante la gestación y el bajo peso materno condicionan la cantidad y el desarrollo óptimo de las células de los órganos del recién nacido.

La malnutrición materna, tanto por exceso como por déficit, no solo implica un riesgo en la salud de la madre, sino que potencialmente perpe-



Fotografía: Freepik.es

túa la malnutrición en generaciones futuras. En estados carenciales, se limita el aporte de nutrientes al recién nacido a través de la leche materna; en casos de exceso de peso y de la excesiva retención de peso posparto, se transfieren mayores cantidades de ácidos grasos al recién nacido, lo que podría condicionar su adiposidad y potenciales riesgos en etapas futuras.

Microbiota en la leche materna

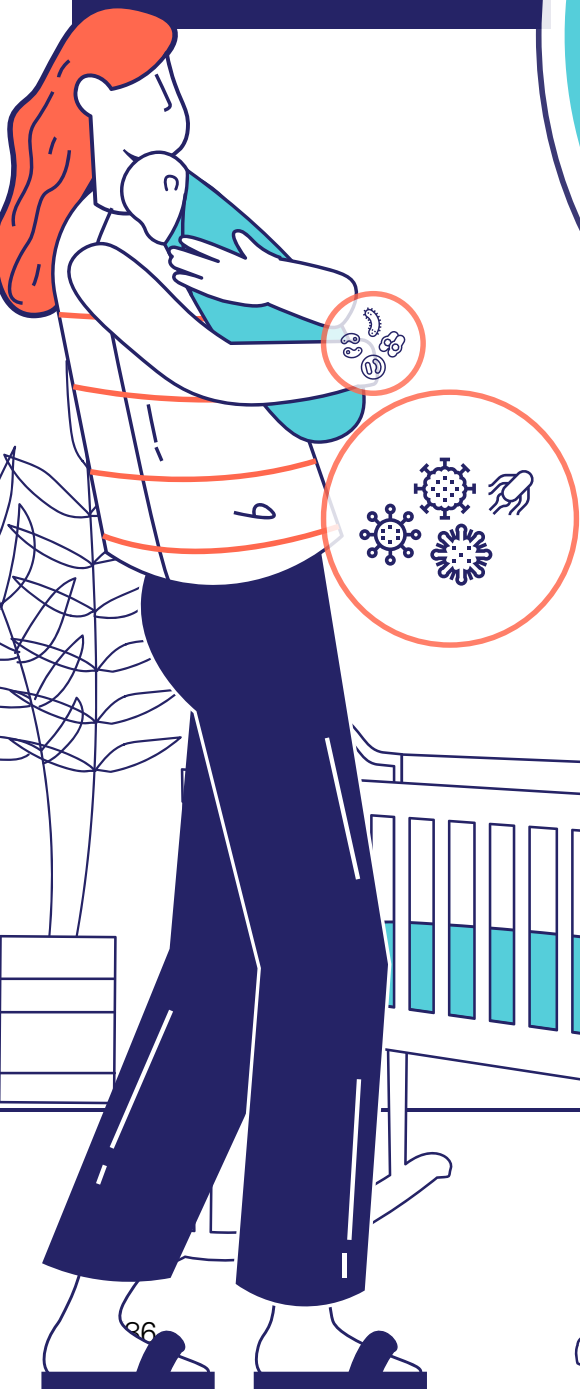
Ante este escenario, desde el 2022 el grupo de investigación desarrolló un proyecto en el Oriente Antioqueño con el propósito de caracterizar la microbiota de la leche materna y su relación con la alimentación en un grupo de 30 mujeres durante el primer trimestre de lactancia. La microbiota de la leche humana, entendida como el conjunto de microorganismos —principalmente de bacterias— presentes en la leche, es de gran importancia en la maduración del sistema digestivo del niño, del aprovechamiento de los nutrientes y de la programación metabólica e inmunológica, aspectos que se reflejan en el adecuado crecimiento y desarrollo del niño lactante e impactan su salud en etapas posteriores de la vida. La microbiota del recién nacido está determinada por la microbiota materna, quien transfiere microorganismos mediante diferentes vías, una de las cuales es la leche humana, responsable de aproximadamente una cuarta parte de la microbiota infantil.

Diversos mecanismos explican la colonización de la leche materna. Uno de ellos se relaciona con la presencia de dos rutas endógenas —o rutas metabólicas— conocidas como la ruta entero-mamaria que conecta el intestino materno con la glándula mamaria y la ruta oro-mamaria que traza una ruta desde la cavidad oral de la mujer hasta la glándula mamaria. En especial, la ruta entero-mamaria suscita gran interés en la comprensión de la forma en que la dieta de la madre impacta su microbiota y, a su vez, la microbiota de su leche. A través de esta vía, algunas bacterias presentes en el intestino materno podrían llegar a la glándula mamaria durante el final del embarazo y la lactancia en un proceso mediado por células inmunológicas, lo cual mantiene una comunicación intestino-glándula mamaria activa, importante para la programación inmunológica y bacteriana.

Al caracterizar el consumo de alimentos de las mujeres de este estudio, el 43 % presentó deficiencia en la ingesta de energía y el 16 % exceso; el 98 % presentó deficiencia en la ingesta de proteínas.

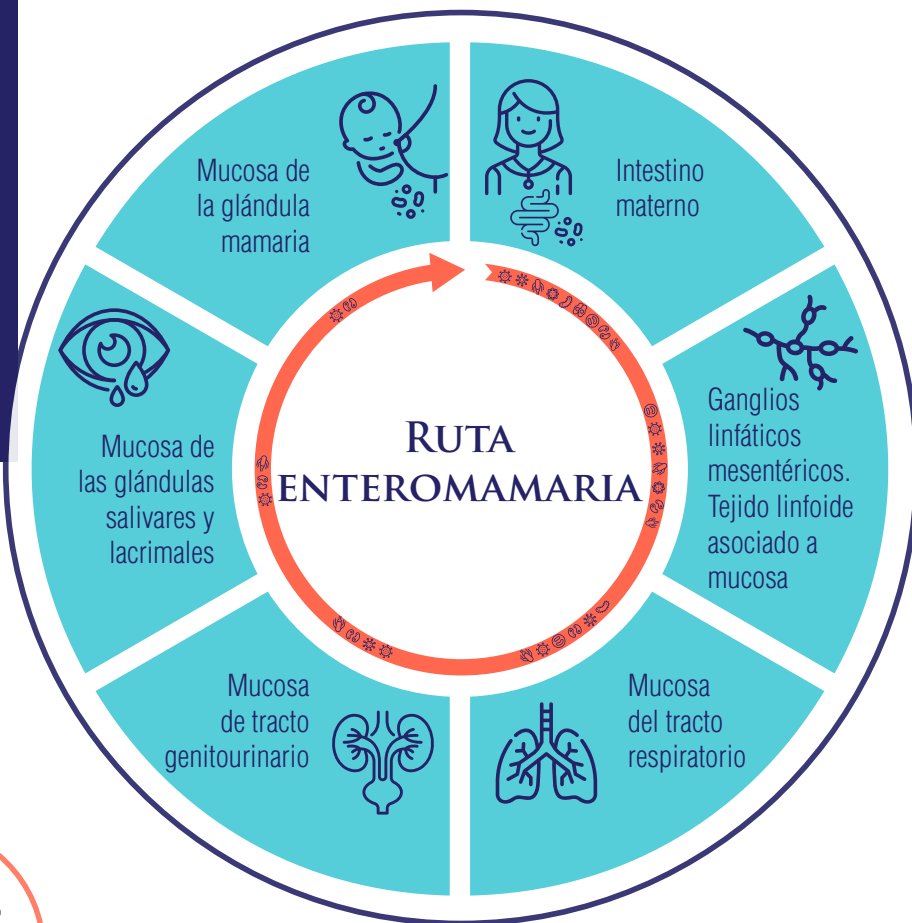
LACTANCIA Y MICROBIOTA

Investigaciones recientes han mostrado que la microbiota intestinal cumple funciones a nivel nutricional, inmunitario y sistémico. El establecimiento de la microbiota en los primeros años de vida es fundamental para el crecimiento, maduración del sistema de defensas y neurodesarrollo.



ORIGEN DE LA MICROBIOTA DE LA LECHE MATERNA

La microbiota intestinal del niño lactante se establece a partir de la microbiota de la leche materna y de las bacterias que configuran el intestino materno



MICROBIOTA DE LA LECHE HUMANA

¿Que aspectos la condicionan?



Ingesta gestacional

↑ El elevado consumo de grasas saturadas disminuye las *Bififobacterium* spp. (benéficas para la salud) ↓

↑ El consumo alto de azúcar aumenta las *Enterobacter* spp. ↑ (nocivas para la salud).



Modo de parto

Se observó una tendencia hacia una mayor riqueza y diversidad bacteriana en las muestras de leche de mujeres con parto por cesárea.



Peso materno

Se observó una tendencia a una mayor diversidad en las bacterias en las mujeres con un peso adecuado.



Lactancia materna

↑ A mayor consumo de carbohidratos simples, disminuye el número de *Bififobacterium* spp. ↓, las cuales se asocian con la salud infantil.

↑ El consumo de Ácido fólico favoreció la presencia de *Akkermansia* spp. ↑, identificada como benfica en la salud humana.

ALIMENTACIÓN PARA UNA MICROBIOTA SALUDABLE DURANTE LA GESTACIÓN Y LA LACTANCIA

Edición 20 | EXPERIMENTA

Diversos estudios han planteado la relación entre el consumo de alimentos de la madre, el equilibrio de su microbiota, la de su leche y la salud materno-infantil



EL DEBER SER VS REALIDAD

REALIDAD: ATENCIÓN SÓLO CENTRADA EN LA LACTANCIA

La ausencia de directrices claras e integrales para proteger a la mujer lactante en las políticas públicas de promoción de lactancia materna genera graves consecuencias para ellas:

1. Ausencia de vigilancia y monitoreo en salud en el posparto.
2. Carencia de educación y cuidado integral.
3. Ausencia de atención emocional y psicológica.
4. Limitadas redes de apoyo en seguridad alimentaria y nutricional.
5. Autopercepción limitada de sus necesidades y derechos.
6. Poca capacidad de las mujeres lactante para exigir sus derechos y cuidados.



REALIDAD

DEBER SER: ATENCIÓN INTEGRAL MUJER LACTANTE - LACTANCIA - NIÑO(A) LACTANTE

Políticas públicas de promoción de lactancia materna, con abordaje integral de las mujeres lactantes:

1. Rutas de atención claras para la atención y seguimiento médico, nutricional y emocional de las mujeres durante en el primer año posparto.
2. Servicios de educación y cuidado que aborden las necesidades físicas, emocionales y psicológicas de las mujeres lactantes.
3. Acceso garantizado a apoyo psicológico y redes de acompañamiento que atiendan las necesidades emocionales de las mujeres durante la lactancia.
4. Fortalecimiento de programas sociales que aseguren la disponibilidad de alimentos nutritivos, complementación alimentaria y suplementación con micronutrientes.
5. Promoción de espacios que sensibilicen y ayuden a las mujeres lactantes a identificar sus necesidades y a reconocer sus derechos relacionados con la lactancia y el posparto.

EL DEBER SER

GARANTIZAR LOS DERECHOS DE LA MUJER LACTANTE ES IMPERANTE PARA ROMPER EL CÍRCULO INTERGENERACIONAL DE LA MALNUTRICIÓN

El patrón de consumo de las madres se caracterizó por un bajo de consumo de alimentos que favorecieran un microbioma saludable

El 86 % consumió grasas saturadas —como las presentes en las mantecas, carnes altas en grasa, mayonesas, alimentos fritos, entre otros, que no benefician la salud—; el 72 % ingirió carbohidratos simples —como el azúcar, panela, bebidas azucaradas, entre otros—. El patrón de consumo de las madres se caracterizó por consumir más de lo recomendado en las guías alimentarias para Colombia en los grupos de azúcares, leche y derivados, cereales, raíces, plátanos y tubérculos. En contraste, no alcanzaron las recomendaciones en la ingesta de carnes, huevos, leguminosas, frutos secos y semillas, frutas, verduras, leguminosas, carnes, huevos, frutos secos y semillas, todos ellos importantes para el equilibrio de la microbiota.

Más fibra y menos azúcares y grasas saturadas en las madres para mejor salud de niños lactantes

Al analizar las bacterias en la leche materna de las participantes, se detectaron 25 filos y 644 géneros bacterianos que fueron relacionados con el consumo de nutrientes presentes en los alimentos. De las relaciones identificadas, encontramos que el consumo de nutrientes específicos durante la gestación y lactancia se relacionan con géneros bacterianos de interés para la salud del niño lactante. En particular, evidenciamos que la ingesta de carbohidratos simples, dentro de los que se encuentra el azúcar, la panela y la fructosa, mostró una correlación positiva con *Enterobacter* spp., es decir, a mayor consumo de este nutriente, mayor abundancia del género. Por el contrario, la ingesta de fibra dietética que proviene de las frutas, verduras, cereales integrales presentó una correlación negativa, lo que indica que a mayor consumo de fibra, menor abundancia del género bacteriano.

Este resultado es interesante, ya que este género bacteriano en específico se caracteriza por presentar especies patógenas oportunistas que se asocian con infecciones hospitalarias en el niño lactante. Ahora bien, llama la atención que, en la mujer, el consumo de estos carbohidratos simples disminuye las *Bifidobacterium* spp., que son consideradas bacterias benéficas; su poca presencia en las heces se ha asociado al desarrollo de enfermedades metabólicas, como diabetes y obesidad, en edades posteriores.

De la microbiota a la seguridad alimentaria antes y después del parto

Las relaciones anteriormente descritas son una aproximación relevante que sustenta, desde lo biológico, el efecto de la disponibilidad de alimentos y la elección de estos por parte de la mujer que

amamanta sobre la microbiota de su leche para potenciar el establecimiento de una microbiota saludable. Además, ratifica la importancia de garantizar la seguridad alimentaria y nutricional de las mujeres, no solo durante la gestación, sino durante la lactancia. No obstante, la visión centrada solo en el amamantamiento y no en el cuidado integral de la mujer, visión que concibe a la mujer solo en su rol de proveedora y cuidadora, se ve reflejada en una brecha significativa entre estos hallazgos científicos y el marco normativo actual.

En este sentido, el grupo de investigación se interesó, además, en analizar la lactancia y a la mujer más allá del fenómeno biológico implicado en el amamantamiento y exploró la normatividad vigente que promueve la lactancia materna en Colombia a la luz del reconocimiento de las mujeres que lactan. Se encontró poca coherencia e integración entre los diferentes lineamientos para la atención de la mujer lactante en Colombia, entre los que se hallan: Estrategia mundial para la alimentación del lactante y el niño pequeño, Política de seguridad alimentaria y nutricional de Colombia, Plan decenal de lactancia materna y alimentación complementaria y Ruta integral de atención materno-perinatal.

En esos documentos de política se encontró, a través de un análisis cualitativo y de metodologías de análisis del discurso, una valoración de la mujer solo en función de su aporte al bienestar de su hijo o hija que relega necesidades de la mujer que van más allá del acto del amamantamiento: su atención nutricional, seguridad alimentaria, salud mental, necesidades educativas y otras condiciones de prevención de riesgos.

En los lineamientos de política estudiados, por ejemplo, se ignora que estas mujeres, tras haber pasado por un proceso de gestación, continúan enfrentando grandes desafíos que se vuelven más críticos por la inacción estatal e institucional que no pone el foco de forma integral en la mujer que debe lactar aun con carencias nutricionales, afectaciones emocionales y su estado de salud en detrimento. El estudio reveló que muchas de ellas asumen como normal la visión deficitaria que desde el sistema de salud se adopta, lo que afecta sustancialmente su capacidad de reconocer y exigir sus derechos.

Esto sugiere la urgencia de actualizar y fortalecer las políticas públicas, como lo hacen otros países de la región como Argentina y Paraguay, para garantizar un reconocimiento integral de la mujer lactante —a través del seguimiento y atención en salud por hasta un año después del parto, lo que permite una detección y atención de riesgos oportuna—. Dicho reconocimiento debe reflejarse en bienes y servicios que garanticen los mínimos de un sujeto de derechos. Finalmente, es necesario revisar y adaptar el proceso de atención posparto establecido por la normativa colombiana, para lo cual es imperativo contemplar un proceso de atención que incluya acciones no solo para promover y proteger la lactancia materna, sino la atención integral e interdisciplinaria para la detección oportuna de riesgos y para favorecer la seguridad alimentaria, la salud física, emocional y nutricional de la mujer en el primer año después del parto. ✖

Este texto se deriva de los proyectos de investigación: «Perfil alimentario y nutricional de Antioquia. Componente materno-infantil» (2019); «Reconocimiento de la mujer lactante como sujeto de derechos. Entre la normatividad y la realidad» (2024); «Patrones de consumo de mujeres lactantes del Oriente antioqueño», «Consumo de alimentos en la mujer lactante y su relación con la microbiota de la leche materna» (2024); desarrollados por el Grupo de Investigación Alimentación y Nutrición Humana, de la Universidad de Antioquia.



Del río Magdalena a la Universidad:

La Biblioteca de Peces de la UdeA

Fotografías: José L. Londoño López y Jorge E. García Melo.

José Luis Londoño López

Biólogo

josel.londono@udea.edu.co

Luz Fernanda Jiménez Segura

Bióloga y doctora en Ciencias

Coordinadora del Grupo de Ictiología de la Universidad de Antioquia —GIUA—

luz.jimenez@udea.edu.co

Daniel Restrepo Santamaria

Biólogo y magíster en Biología

daniel.restrepo12@udea.edu.co

La Colección de Ictiología de la Universidad de Antioquia —GIUA—, fundada en 2002, es un repositorio de especímenes de peces recolectados en el marco de proyectos de investigación dentro de la cuenca del río Magdalena. Ha sido fundamental en la comprensión de los cambios ante tensores ambientales y en los aportes a la conservación de ambientes acuáticos.



*Astrolepus marmoratus**Brycon henni**Caquetaia kraussii**Chaetostoma floridablancaense**Eigenmannia campocsaense**Trichomycterus stellatus*

Por generaciones, los humanos han dependido de los ríos para su sustento, han aprendido a leer las señales de las aguas y, con el paso del tiempo, han sido testigos del cambio en la abundancia de la biota acuática, que incluye la de los peces. El conocimiento experiencial de los pescadores ha aportado a la investigación científica y a la promoción de acciones que restauran y protegen estos ecosistemas acuáticos vitales.

La historia geológica del territorio que hoy conocemos como Colombia es bastante particular debido al levantamiento de los Andes, que inició hace diez millones de años. Los Andes —un cinturón de montañas que desde el sur bordea la línea occidental del continente suramericano y termina en la región noroccidental con tres ramales que incluyen un amplio valle de inundación interandino— han sido decisivos en la distribución de la biota que conocemos actualmente en esta región de América. Si bien la cuenca del río Magdalena es una de las cinco regiones biogeográficas con la menor riqueza de peces (238 especies de las 1716 que en total se reportan a la fecha en las redes fluviales dentro del territorio colombiano), es la que alberga los mayores endemismos a nivel suramericano (cerca del 70 % son especies únicas en el mundo).

La importancia de los ecosistemas acuáticos presentes dentro de estas redes fluviales no radica únicamente en la biodiversidad que los habita, sino también en los múltiples beneficios para las comunidades y los ecosistemas: desde la regulación del ciclo del agua hasta la captura de carbono hasta el sustento directo de las comunidades que dependen de ellos para su supervivencia. A pesar de su importancia, este vasto territorio acuático sigue siendo un misterio por descubrir que, desafortunadamente, está amenazado por los cambios asociados con actividades como la contaminación del agua, la deforestación, la pérdida de conexión dentro de la red y la presión por la explotación pesquera, todas estas en interacción con el cambio climático.

El conocimiento sobre la diversidad de peces reside en las 49 colecciones de peces que hay en el país, de las cuales solo 19 están sistematizadas y registradas en el Registro Nacional de Colecciones. Estas colecciones no solo ayudan a preservar ejemplares de las especies, sino que son una fuente vital de conocimiento para los proyectos de investigación que buscan comprender y proteger la biodiversidad acuática de nuestro país.

Un ejemplo notable de este esfuerzo de conservación es la Biblioteca de los Peces de la Cuenca del río Magdalena, un proyecto liderado por el Grupo de Ictiología de la Universidad de Antioquia (GIUA). Este esfuerzo colaborativo reúne a pescadores, científicos y comunidades locales para fortalecer las estrategias de conservación, promover un sentido compartido de responsabilidad y valorización sobre la riqueza hídrica y de peces y garantizar que las futuras generaciones puedan disfrutar de

estos recursos naturales. La historia de la conservación de los peces de agua dulce en Colombia no solo se escribe en los laboratorios, sino también en las manos de las comunidades que conocen profundamente este rico patrimonio natural.

Una colección que crece

La Biblioteca de los Peces, conocida como la Colección de Ictiología de la Universidad de Antioquia (CIUA), nace como respuesta a la creciente preocupación de los miembros del grupo de investigación por generar un repositorio de la riqueza de especies cuyas poblaciones enfrentan la acelerada modificación de los ecosistemas acuáticos debido a la intervención humana. La pérdida de bosque y del área inundable, la contaminación causada por la minería, las industrias y nuestros hogares y la pérdida de conectividad fluvial debido a la pérdida de suelos, generada por la construcción de ciudades y de vías, el avance de la frontera agropecuaria sobre los planos laterales que inunda estacionalmente el río y la construcción de embalses dentro de los cauces de ríos para generar energía eléctrica, han alterado marcadamente las redes fluviales del país. El desarrollo y bienestar de la población humana ha venido afectando entonces a los ecosistemas acuáticos dulceacuícolas y a las especies que dependen de ellos. Este escenario de modificación al ambiente ha conllevado que, en los últimos 50 años, las capturas de los pescadores artesanales en el río Magdalena se hayan disminuido en un 70 %.

En las expediciones que desarrolla el GIUA se recorren los ríos, ciénagas, quebradas y embalses en diferentes cuencas del país, colectando ejemplares de peces y muestras de sus tejidos (de los que se puede extraer su información genética). Todos ellos son insumos para el avance del conocimiento de las especies de peces. La CIUA no solo alberga ejemplares de las especies sino también fotografías de sus individuos en las que se retratan las características morfológicas útiles para su identificación. Estas expediciones, que recuerdan las grandes exploraciones de los naturalistas del pasado, son el resultado de un esfuerzo conjunto de investigadores que enfrentan una variedad de desafíos, desde condiciones climáticas adversas hasta el difícil acceso a algunos de los rincones más remotos del país en departamentos como Cauca, Huila, Tolima, Quindío, Cundinamarca, Valle del Cauca, Antioquia, los Santanderes, Córdoba, Bolívar, Atlántico, Magdalena, Cesar.

Durante el siglo pasado los naturalistas recorrían el país en tren o a lomo de mula para explorar su riqueza natural, hoy los científicos enfrentan nuevos retos logísticos, pero mantienen intacta la



Callichthys oibaensis



Parodon alfonsoi



Cynodonichthys magdalenae



Roeboides dayi



Rineloricaria giua



Triportheus magdalenae



Exploradores del GIUA utilizan equipos modernos de pesca.

Fotografía: José Luis Londoño López. Cortesía del grupo de investigación.

pasión por descubrirla, registrarla y protegerla. La diferencia es que ahora, junto con los cuadernos de campo y las redes de pesca, viajan computadores, GPS, equipos para registro fotográfico y de información genética, instrumentos que permiten capturar no solo la forma visible de la vida, sino también su rastro molecular. Cada expedición es una historia compartida entre ciencia y territorio. Es una sinergia entre quienes estudian y quienes habitan estos ecosistemas, entre la tecnología y la tradición, entre el pasado que abrió el camino y un presente que sigue revelando lo mucho que aún queda por conocer.

Expediciones por una vasta red hídrica

Las expediciones científicas realizadas hoy por el GIUA evocan las exploraciones pioneras de la ictiología, como las de Alexander von Humboldt en 1805. Humboldt fue uno de los primeros en describir taxonómicamente varias especies de peces endémicas de la región, como el bagre «capitán de la Sabana» *Eremophilus mutisii* y el «negrito de Popayán» *Astroblepus grimaldi*. Estas descripciones marcaron un hito en el conocimiento de la biodiversidad de los ríos colombianos. Más tarde, naturalistas como Carl H. Eigenmann continuaron este trabajo con publicaciones que incluyeron la descripción de nuevas especies para las cuencas del país.

Actualmente, el GIUA sigue esa tradición de exploración, pero con herramientas modernas del siglo XXI, que combinan el rigor científico clásico con la potencia de las tecnologías actuales. En el laboratorio, se utilizan plataformas computacionales de alta capacidad para analizar los datos genéticos extraídos de los tejidos de los peces. Esto permite identificar patrones ocultos, descubrir nuevas especies y comprender mejor las



Pescadores locales en la ciénaga Quintanilla, Soplaviento-Bolívar.

Fotografía: José Luis Londoño López. Cortesía del grupo de investigación.

interacciones de los peces con su entorno. Este proceso de identificación molecular, junto con los métodos tradicionales basados en la morfología, ha transformado nuestra comprensión de la biodiversidad, ayudando a llenar vacíos en áreas como la taxonomía, la inferencia filogenética, la biogeografía e incluso la conservación de la biodiversidad. Un ejemplo de ello es *Rineloricaria giua*, una nueva especie de pez descrita por María Camila Castellanos, investigadora del GIUA, que gracias a la valiosa información recopilada por Biblioteca de los Peces se suma a la generosa lista de nuevas especies que continúan ampliando el conocimiento sobre la rica biodiversidad de los ríos colombianos.

Hoy en día, nuevas tendencias impulsadas por el desarrollo tecnológico han permitido avances significativos en el conocimiento de la biodiversidad. La secuenciación avanzada de ADN y el *metabarcoding*, una técnica computacional de la bioinformática para el análisis de ADN y la identificación de especies, están abriendo nuevas puertas para descubrir una diversidad antes oculta. Sin embargo, su efectividad depende de la calidad y precisión de las bases de datos de referencia de ADN a nivel local y regional.

Genes, fotografías y distribución de peces para consulta

La construcción de la Biblioteca de los Peces ha permitido profundizar la comprensión taxonómica de los peces en el norte de los Andes, una región con elevados endemismos. Esta particularidad hace que esta región sea especialmente importante dentro del contexto neotropical. Además de las especies de interés para las redes de los pescadores, existen en esta región especies de tamaño pequeño que, aunque no tienen



Laguna Saldanita, uno de los ecosistemas muestreados en las expediciones realizadas por el GIUA. Al fondo, el cerro Pacandé, en Natagaima-Tolima.
Fotografía: José Luis Londoño López. Cortesía del grupo de investigación.

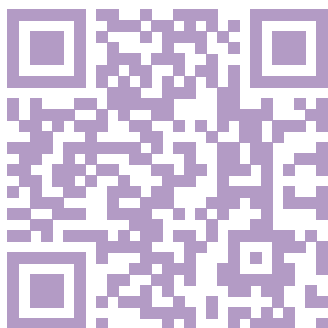
un valor comercial directo, son relevantes en la comprensión de la biodiversidad. Su protección es fundamental porque desempeñan roles ecológicos esenciales en los ecosistemas acuáticos. La conservación de especies endémicas es, por lo tanto, de alta prioridad, y la información contenida en la colección CIUA es una herramienta clave para lograr este objetivo.

Hasta la fecha, el proyecto Biblioteca de los Peces ha generado información de algunos genes de 1270 especímenes que representan 183 especies de peces, todas ellas vinculadas con información completa de recolección y catálogo, así como aproximadamente 2000 fotografías de alta resolución de los especímenes.

Mientras el proyecto avanza, somos testigos de un cambio profundo en la manera en que entendemos y manejamos la biodiversidad. Poniendo a disposición esta base de datos genética y de fotografías, el grupo GIUA hace un aporte muy importante al estudio y la conservación de los ecosistemas acuáticos en Colombia: asegurar que la biodiversidad de peces de agua dulce, con su riqueza de especies endémicas, sea conocida, apreciada y protegida.

A mediados del siglo pasado, lo que se hace ahora en las expediciones del GIUA podría haber parecido ciencia ficción, pero es ahora una realidad. Actualmente la ciencia escribe en tiempo real la historia de la biodiversidad y los avances tecnológicos permiten que este relato se convierta en una realidad que beneficia tanto a la naturaleza como a las personas. Con cada muestra colectada, con cada dato analizado, el Grupo de Ictiología nutre la colección de peces, patrimonio de nuestro país protegido por la Universidad de Antioquia, y con ello se construye un invaluable legado que aporta a un futuro en el que los ríos de Colombia continúen siendo fuente de vida, belleza y cultura. X

El material disponible para consulta se encuentra en las siguientes plataformas:



Catálogo Visual de Peces de Agua Dulce de Colombia



NCBI GenBank

Bases de datos de peces para la conservación en Colombia, Centro Nacional de Información Biotecnológica



Sib-Colombia

Colección de Ictiología de la Universidad de Antioquia

Glosario

Bioinformática: Campo interdisciplinario que combina biología, informática y matemáticas para analizar y procesar gran cantidad de datos biológicos, como secuencias de ADN, con el fin de obtener información útil para la investigación.

Biota: Conjunto de la fauna y la flora de una región.

Endemismo: Término que se refiere a especies que solo existen en una región geográfica específica y no se encuentran en ninguna otra parte del mundo. Estas especies suelen ser más vulnerables a la extinción.

Especímenes: Ejemplares de organismos, como peces, que son colectados para su estudio científico y preservación en colecciones. Estos ayudan a los investigadores a identificar especies y a estudiar la biodiversidad.

Filogenética: Ciencia que estudia las relaciones evolutivas entre especies, creando «árboles filogenéticos» que muestran cómo diferentes organismos están relacionados entre sí a lo largo del tiempo.

Metabarcoding: Un método avanzado que permite identificar rápidamente múltiples especies en una muestra mediante el análisis de su ADN. Es especialmente útil para descubrir especies difíciles de identificar a simple vista.

Taxonomía: Disciplina científica que nombra y clasifica a los organismos vivos en categorías jerárquicas como especies, géneros, familias y otros, reflejando relaciones evolutivas y ordenando la biodiversidad del planeta.

Este texto se deriva del proyecto de investigación «*Biblioteca de la Vida*» financiado por Empresas Públicas de Medellín en el marco del convenio entre la UdeA y EPM *Gestión integral del recurso hídrico, la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos en áreas de interés de EPM* acta CT: 2021-000023-A3.



CÓMO FUNCIONA REALMENTE EL MUNDO, DE VACLAV SMIL

Guillermo Pineda

Profesor jubilado del Instituto de Física,
Universidad de Antioquia
guillermo.pineda@udea.edu.co

Se dice que soñar no cuesta nada, pero si ante los grandes retos que enfrenta la humanidad no se hace más que soñar con un mundo mejor, verde y descontaminado, sin pararse a reflexionar cómo puede ser posible, si es que es posible, lograr tan idílica ambición, se puede entrar en el mundo de la ilusión, en cuanto que el mundo que podríamos llamar real, tangible y concreto transita por senderos muy diferentes. Por esta razón, y ante la interminable letanía de meas culpas de la especie humana, cuyas acciones han dejado huella en el planeta, y el reclamo de suspender de una vez y por todas el consumo de hidrocarburos, supuesta fuen-

te de todos los males, vale la pena enterarse, así sea en mínimo grado, de cómo y hasta qué punto es posible alcanzar lo objetivos propuestos, para lo cual el texto de Vaclav Smil, *How the World Really Works** (Cómo funciona realmente el mundo) aporta información esclarecedora que permite al interesado hacerse a una idea de las verdaderas dimensiones del problema que enfrentamos y de las posibles alternativas, en el corto y largo plazo, a los sistemas de generación de energía altamente contaminantes que dominan el escenario y a la producción de materiales de construcción e insumos agroquímicos que en la actualidad sustentan nuestra existencia.

Entre los sesudos y muy bien documentados estudios de Smil de la relación entre la humanidad y la generación y el consumo de energía a lo largo de la historia, con énfasis en los últimos doscientos años, en los que la Revolución Industrial provocó un cambio de grandes repercusiones económicas, políticas y sociales en los medios de producción, se destaca el del aumento de la población mundial, que pasó de unos mil millones de habitantes en 1800 —a inicios de la mencionada Revolución Industrial— a unos ocho mil millones en la actualidad. Según las tendencias actuales del crecimiento demográfico, esta cifra podría ascender a diez mil millones para mediados de este siglo. También resul-

ta de gran relevancia en este período de tiempo el aumento de la esperanza de vida, que pasó de unos treinta a cerca de setenta años en el promedio mundial y a unos ochenta en los países de altos ingresos, lo que unido al crecimiento de la población tiene como consecuencia el incremento en la demanda de recursos necesarios para sostener la vida tal cantidad de personas durante sus prolongadas existencias. pone de presente uno de los retos más inmediatos y cruciales que afronta la humanidad: el de proveer sustento para todos y a la vez preservar el planeta en condiciones de habitabilidad digna y saludable.

Para saber cómo se llegó a la situación descrita es necesario estudiar la historia de la generación de energía antes y durante los inicios de la Revolución Industrial y, particularmente, de cómo la madera, cuya combustión era utilizada para satisfacer la necesidades básicas de calefacción y alimentación y las no menos importantes de manufacturas y siderurgia, fue sustituida por la del carbón mineral y, posterior y complementariamente, el petróleo. La evolución de las fuentes de energía fue acompañada por el desarrollo de la ciencia y la tecnología, que hizo posible domar la fuerza del vapor como motor fundamental del desarrollo industrial, así como el más impresionante logro intelectual de la humanidad: la ciencia moderna con sus consecuentes aplicaciones tecnológicas que, para bien o para mal, se han vuelto indispensables en nuestra cotidianidad.

De acuerdo con Vaclav Smil, la sociedad actual se sustenta en cuatro pilares básicos e imprescindibles, al menos en las condiciones presentes. Estos son, de acuerdo al orden de importancia que les otorga el autor, el amoníaco, el acero, el cemento y el plástico, cuya obtención en todos los casos depende del petróleo y sus derivados. Sin los agroquímicos y los fertilizantes artificiales que se obtienen a partir del amoníaco solo sería posible producir alimentos para un poco menos de la mitad de la población actual. El amoníaco es sintetizado del hidrógeno —que se obtiene del metano, que es un hidrocarburo— y del nitrógeno —que se obtiene del

aire mediante el proceso Haber-Bosh, que requiere altas temperaturas que se logran mediante la combustión de hidrocarburos, con la consiguiente emisión de CO₂ que produce una alta huella de carbono—. La producción de aceros en su inmensa variedad de especificaciones de acuerdo con los usos a los que estén destinados es un proceso que demanda un alto consumo de energía tanto en la minería del hierro, su componente básico, como en el proceso siderúrgico propiamente dicho. De nuevo nos encontramos con una actividad industrial que genera considerables emisiones de CO₂. Pero, no menos contaminante resulta la producción de cemento para la elaboración del concreto con el que, en asocio con el acero, se construyen nuestras ciudades. (Una consideración adicional: a diferencia del Panteón de Roma, que se mantiene incólume a pesar de haber sido construido con cemento hace más de dos mil años, las construcciones de concreto tienen una vida útil que no sobrepasa los cien años, debido a lo cual la mayoría de las estructuras de la mayoría de las grandes ciudades deben ser reconstruidas en el corto plazo, además de que, debido al aumento de la población y a la expansión industrial, las ciudades no paran de crecer). Por último en este breve recuento, es necesario considerar los plásticos con su extraordinaria ubicuidad y su carácter altamente contaminante del ambiente, también obtenidos como subproductos de la refinación del petróleo. Nos podríamos gastar mucho tiempo enumerando los usos y aplicaciones de los

plásticos y hasta qué punto resultan imprescindibles, pero esa tarea, de no difícil realización, queda pendiente para el lector.

Con el fin de paliar los efectos del calentamiento global debido a la contaminación ambiental, la mayor parte de los gobiernos se han fijado la muy optimista meta de 2050 para reducir a cero las emisiones de CO₂, para lo cual han puesto sus esperanzas en la generación de energía a partir de fuentes renovables como los generadores eólicos, los paneles fotovoltaicos, las centrales hidroeléctricas y la renaciente energía nuclear, entre otras. Sin embargo, y para tomar conciencia del tremendo reto que supone el reemplazo o la eliminación de los combustibles fósiles, es necesario tener en cuenta que todas y cada una de las fuentes de energía limpia que se han mencionado demandan para su implementación la utilización de ingentes cantidades de los materiales mencionados, y no hay a la vista, al menos de momento, sustitutos disponibles y confiables.

Sin caer en el catastrofismo de los ambientalistas radicales ni en el tecnooptimismo de los negacionistas interesados, se puede decir que vivimos en un mundo donde el cambio permanente y la capacidad de adaptación a condiciones hostiles han signado la historia de la humanidad. El texto de Smil nos puede aportar una visión racional y desapasionada para contemplar el panorama con objetividad y para hacernos a una buena idea del tremendo reto al que nos enfrentamos como especie.

Epílogo: Gracias al consumo de un derivado del petróleo para la iluminación, el kerosene, se salvaron las ballenas, que se encontraban en inminente peligro de extinción a mediados del siglo XIX. ✕

Referencias

Smil, V. *How the World Really Works: The Science Behind How We Got Here and Where We're Going*. Kindle Edition. 2022.



Una cuestión de eficiencia energética en la vida de Juan

Mario Víctor Vázquez

Químico y doctor en Ciencias Químicas.
Profesor y divulgador de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia.
mario.vazquez@udea.edu.co

Una serie de ruidos extraños distrajeron a Juan de la lectura de un artículo publicado en una revista de divulgación científica. La curiosidad pudo más que él, y decidió averiguar personalmente de qué se trataba.

Luego de atravesar el jardín florecido, observó a lo alto de una escalera al vecino que trabajaba en el techo de un galpón manipulando unos tubos plásticos que finalizaban en uno de mayor tamaño que a su vez descendía y se conectaba con otros más pequeños, cada uno de los cuales salía de unas canecas azules.

—No me diga, Don José, que está construyendo una nave espacial allá arriba —dijo divertido al observar todo aquel despliegue.

—En lugar de hacerte el gracioso, ¿por que no me alcanzas aquel tubo amarillo? —señaló desde lo alto Don José.

—Yo le ayudo si me cuenta qué cosa extraña está haciendo —respondió.

—Nada del otro mundo, nada de naves espaciales; simplemente estoy organizando esto para recoger agua de lluvia, para usarla luego en el jardín, en la casa. ¿No te parece una manera sencilla de aprovechar los recursos naturales?

Juan no contestó, pero el comentario le hizo recordar algo:

—Parece que me hubiera estado espiando, vecino; justo estaba concentrado leyendo algo que tiene que ver con esto cuando me interrumpió la construcción de la nave espacial.

—Deja de hacerte el gracioso y pásame aquellas llaves plásticas, que termino de organizar aquí y me cuentas más detalle de eso maravilloso que estabas leyendo —dijo Don José con ironía.

Una vez finalizados los ajustes en aquel techo, Don José describió con orgullo cómo funcionaba ese sistema artesanal para recoger agua de lluvia. Recordando lo que había mencionado su vecino, lo invitó a tomar un jugo debajo de un frondoso árbol cargado de aguacates.

—¿Cuál era esa noticia que me querías comentar?

—Tiene que ver con un avance tecnológico increíble, pero no sé cómo explicarlo, no es por ofender, pero tal vez sea... digamos, muy moderno para usted.

—Haz el intento —contestó, divertido, Don José.

—Es que tiene que ver con algo increíble: el hidrógeno verde. ¿Se había imaginado algo tan avanzado como eso? Tiene que ver con usar ¡el hidrógeno! como combustible, ¿no le suena maravilloso?

Don José no contestó de inmediato. Primero tomó un gran sorbo de jugo, como para generar suspenso. Luego, con una seña, le pidió que lo esperara un momento. Se dirigió al interior de la casa. Al regresar, venía con un antiguo libro en su mano, y dijo:

—No sé cómo contestar.

—Sabía que esto quedaba un poco complicado para que lo comprendiera —interrumpió Juan.

—Me refiero a que no sé cómo contestar sin que lo tomes a mal, porque no se trata necesariamente de una tecnología «moderna» —dijo haciendo las señas de las comillas con sus dedos—, como te voy a mostrar en este texto que me gusta conservar por si algún vecino indiscreto comienza con sus preguntas. Estamos hablando de generar hidrógeno gas mediante el proceso de electrólisis para luego usarlo como combustible, ¿verdad?

—Claro —contestó entusiasmado—. ¿No le parece una idea genial? Aprovechando que en la combustión solo genera agua, ¡y lo tenemos por todas partes! No entiendo cómo no se les ocurrió antes.

—¿Y qué te hace pensar que eso no se hizo antes? —contestó mientras abría el libro—. Como sabía que no me ibas a creer, aquí traje este texto. Mira lo que dice aquí: «los primeros en identificar al oxígeno y al hidrógeno como producto de la electrólisis del agua fueron Carlisle y Nicholson en el mes de mayo del año... 1800» —dijo haciendo énfasis en la fecha—. Como te parece que ese mismo año Alexander Volta había presentado por primera vez la pila que lleva su nombre, lo que hoy solemos llamar batería, y justamente con esa pila estos señores hicieron la electrólisis y entendieron qué se producía cuando se descomponía el agua. De alguna manera, esta forma de generarlo fue un tanto «verde», como mencionabas antes.

Juan lo miró sorprendido, pensando en la fecha que le había mencionado su vecino.

—Pero, entonces, ¿si se pudo obtener el hidrógeno por electrólisis en aquellos años, que seguramente lo conoció de primera mano, por qué nunca se ha utilizado masivamente el hidrógeno como combustible?

Ignorando el ácido comentario sobre la fecha en que se realizó el experimento, Don José cerró el libro y comentó:

—Tienes que pensar que, si en tantos años no hemos podido usar masivamente el hidrógeno como combustible, seguramente es porque no todo es color de rosa.

—¿Por qué se dice de color de rosa? —interrumpió.

—Otro día te lo cuento. Te decía que desde hace muchos años se conoce esta manera de producir este gas, y sabemos que es un buen combustible. Sin embargo, una cosa es hacer el experimento a pequeña escala y otra pensar en toda la tecnología que se requiere para la producción masiva, en la cantidad de energía que se debe aplicar y, especialmente, en que no alcanza con producirlo: se debe resolver la manera de conducirlo y almacenarlo de manera segura. Piensa que es muy complicado evitar que haya fugas por su baja densidad; es corrosivo, muy inflamable. Recuerda, por ejemplo, lo que le sucedió al dirigible Hindenburg. Además, para tenerlo de manera líquida se necesita utilizar temperaturas muy bajas.

—¿Qué tan bajas?

—Piensa que a $-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ pasa de líquido a gas.

Juan se quedó pensando, casi desanimado por todos esos datos, hasta que recordó aquella palabra.

—Y eso de verde... ¿por qué le llaman así a este gas incoloro?

—Lamento reconocer que alguna vez haces preguntas interesantes —dijo Don José con gracia.

Juan puso cara de ofendido, pero escuchó con atención la explicación.

—Hasta donde he leído, le llaman así porque la propuesta es obtenerlo por electrólisis, algo que, ya te comenté, se conoce desde hace más de 200 años, pero utilizando fuentes de energías más sostenibles como la eólica, fotovoltaica, etc.

—Pero no parece muy convencido — Juan.

—Es que es algo bonito de plantear, pero complicado de resolver. Por eso llevamos tantos años con esta idea: pensar en un sistema que sea perfecto, que produzca este gas, que lo podamos trasladar y almacenar y que, además, use energías alternativas; suena bien, pero estamos lejos de conseguir que todo el proceso sea eficiente. Cada sistema de aprovechamiento, baterías, generadores eólicos, celdas fotovoltaicas: no tienen una eficiencia de 100 %, y además para construirlos se requiere utilizar energía... el ciclo es complejo como verás.

—Pero no me contesta lo del hidrógeno verde. Está haciendo tiempo porque no lo sabe, ¿verdad?

Don José se puso de pie como anticipando el final de la conversación.

—Eso es lo más complicado mi inocente amigo y vecino, si te pones a pensar cuántas veces ves publicidades que dicen que el producto es «verde», que con eso da una idea de «ambientalmente bueno». Sin embargo, no hay quedarse con ese nombre, hay que averiguar bien de qué se trata todo, porque corres el riesgo de estar frente a un claro ejemplo de greenwashing.

—*What?* —preguntó Juan siguiendo el juego.

—En español sería como «lavado verde», y tiene que ver con el uso intencional de esta palabra para inducir engaño en el público y dejar la idea que lo que se pretende promocionar es muy bueno para el ambiente y por eso es «verde». Hay que ir más al fondo. Hablando de fondo, para cerrar este fructífero encuentro te voy a mostrar un sistema eficiente de utilización de energía que tengo por aquí...

Juan lo siguió obediente e intrigado. Mientras tanto, Don José se detenía de vez en cuando, como tratando de recordar dónde había dejado ese maravilloso sistema, hasta que al parecer lo encontró, o mejor, la encontró:

—Mira, aquí está —dijo señalando a un costado.

—¿Por quién me toma? Ahí solo veo una planta, toda muy bonita y florecida, pero dónde está el famoso sistema.

—¿Te parece poco lo que hace esta planta? Toma energía del sol, incorpora CO₂, libera O₂ y, como si fuera poco, sintetiza glucosa para alimentarse.

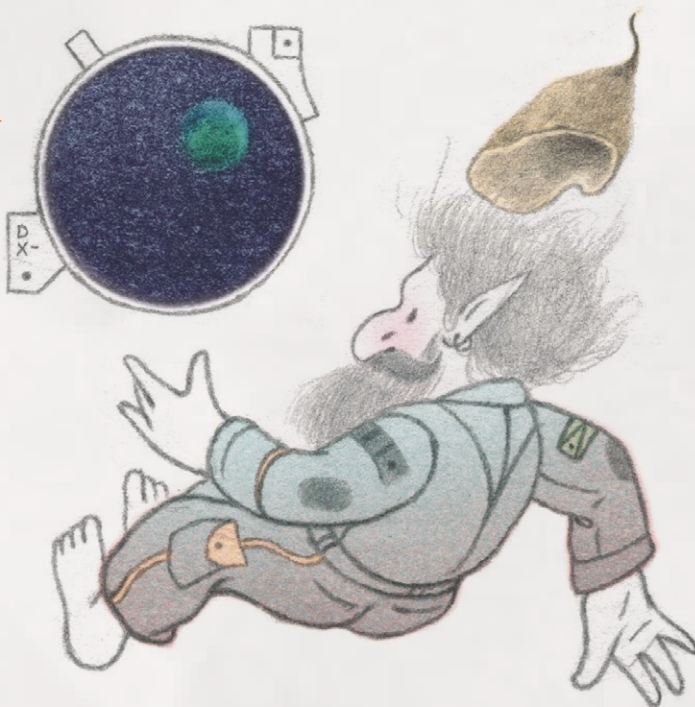
Juan se despidió de su vecino con la sensación de haber sido sorprendido una vez más.

Al día siguiente, los primeros rayos de sol que entraban por una pequeña ventana de la cocina iluminaron la cara de Juan, que tomaba un café y miraba una hermosa begonia que tenía en el exterior. En su mirada se percibía algo de curiosidad o, tal vez, algo de admiración.

EL ALKIMISTA

Microorganismos desde el espacio: más visibles que nunca

El plancton produce más del 50 % del oxígeno que respiramos, y es posible observarlo desde el espacio porque su tamaño microscópico hace que se mueva con las mareas sin hundirse. Su monitoreo consiste en medir las concentraciones de clorofila de este material, ya que esta absorbe longitudes de onda correspondiente al azul y al rojo del espectro electromagnético, lo que hace que refleje el color verde.



Del sol y el viento al hidrógeno verde y al metano sintético

A propósito del proceso de electrólisis, pocos años después de la presentación de la pila de Volta, Humphry Davy utilizó en una de sus conferencias una enorme batería construida con 2 000 placas y ubicada en el sótano de la *Royal Society* de Londres. En esta presentación, extendió cables desde el sótano hasta el escenario, donde sorprendió a su público cuando generó una gran chispa de más de 6 centímetros. Con esta batería lograría la separación de metales alcalinos térreos a partir de sus sales fundidas.

Absorber la luz en delgadas películas: la revolución de las celdas solares de perovskita

La estructura de la perovskita, un óxido de titanio y calcio, abrió el camino a la síntesis de materiales con propiedades interesantes en distintos campos, por ejemplo el de los superconductores. Estos materiales se caracterizan por conducir la electricidad sin resistencia alguna, a partir de una temperatura dada. Poseen también características únicas cuando se encuentran dentro de un campo magnético.



Los legados de la leche

En un estudio sobre 93 676 mujeres, publicado en el *Journal of the American Heart Association*, se verificó que la lactancia materna estuvo asociada con un menor riesgo de accidente cerebrovascular entre las mujeres posmenopáusicas. Todas las mujeres en este análisis habían tenido uno o más hijos, y el 58 % informó haber dado el pecho a sus hijos. Por lo anterior, se puede afirmar que la leche materna no solo es benéfica para el niño lactante, sino también para su madre.

X

20

- Si haces investigación en la Universidad de Antioquia y quieres divulgar tu trabajo, puedes postular un artículo a la revista *Experimenta*.
- Buscamos artículos o reportajes gráficos que divulguen el resultado o avance destacado del trabajo de un investigador, un grupo de investigación o una asociación de grupos de la Alma Máter. No es una revista de difusión científica, sino una publicación de ciencia e investigación para un público general.
- Si no estás afiliado a la UdeA, pero participas en una investigación con alguno de nuestros grupos, también puedes presentar tu artículo.
- El lenguaje debe ser sencillo y comprensible, dirigido a un público general (especialmente jóvenes), para contarles los objetivos, el proceso, los hallazgos y los resultados o impactos de tu estudio.
- El artículo deberá utilizar recursos que les permitan a las personas comprender un tema desde su propia vivencia. Usa ejemplos y casos que relacionen la investigación con la vida cotidiana. También puedes usar cifras y datos de contexto que le den cercanía o universalidad a nuestros estudios científicos.
- Si requieres asesoría o mayor información, no dudes en contactarnos al correo **revistaexperimenta@udea.edu.co**. Te acompañaremos en todas las etapas de la generación de un artículo, para que tu investigación sea conocida y comprendida por muchas personas.

Si te interesan nuestros temas y quieres recibir la revista en tu institución —no importa que no estés afiliado a la UdeA—, regístrate, y te la haremos llegar. Envíanos un correo electrónico a revistaexperimenta@udea.edu.co con:

- Nombre.
- Dirección de la institución, domicilio u oficina.
- Nombre de la institución donde trabajas o estudias.
- Carrera, curso o área del conocimiento a la que perteneces.



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

EXPERIMENTA



www.udea.edu.co

#UdeACiencia



@UniversidadDeAntioquia



@UdeA