



CICTERRÁNEA

- Revista de Comunicación de las Ciencias de la Tierra -

Amor a lo extremo

Los habitantes de la
Laguna Negra

De detectives a soñadores

Tras las huellas del agua
y el viento en las rocas

De glaciares a desiertos

El ocaso de una Era



Año 5

Número 5 – 2021

ISSN 2618-2122

COMITÉ EDITORIAL

Editoras responsables

Dra. Emilia Sferco
Dra. Beatriz G. Waisfeld
Dra. Gisela Morán

Comité editor

Gga. Cecilia Echevoyen
Ing. Nexxys C. Herrera Sánchez
Dr. Fernando J. Lavié
Dra. Cecilia E. Mlewski
Dr. Diego F. Muñoz
Dr. Iván Petrinovic
Dra. Fernanda Serra
Mgr. Eliana Soto Rueda

Diagramación y diseño gráfico

Paula Benedetto

Corrección de estilo

Dr. Alberto M. Díaz Añel

Foto de Tapa: Vista panorámica de la Laguna Negra, Puna de Catamarca, Argentina (Autor: Alexander Dan Driessche).

Esta revista de formato digital se publica de manera desinteresada con la finalidad de difundir la actividad e investigación del CICTERRA. Los artículos y opiniones firmadas son exclusiva responsabilidad de los autores o editores. Lo expresado por ellos no refleja necesariamente la visión o posición de la Institución.

Contacto: cicterranea@gmail.com

www.cicterra.conicet.unc.edu.ar/revista-cicterranea/

<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/cicterranea>

Seguinos en:



C I C T E R R A



Director: Dr. Edgardo Baldo
Vicedirector: Dr. Marcelo G. Carrera

Contacto:
secretariacicterra@fcefyn.unc.edu.ar
Av. Vélez Sársfield 1611,
X5016GCB Córdoba, Argentina
Teléfono: +54 351 535-3800 ext. 30200
www.cicterra.conicet.unc.edu.ar

El quinto número de Cicterránea desembarca en un contexto sin precedentes en la historia reciente de la humanidad. Con la llegada de la pandemia de la COVID-19, la vida de la mayoría de las personas en el planeta, las prioridades individuales y sociales y los debates cambiaron casi de manera simultánea, como así también la forma en que nos comunicamos y nos relacionamos.

Durante el último año, la relación ciencia y sociedad no estuvo ajena a estos grandes cambios. La vorágine de información que trajo consigo la pandemia, puso en primer plano una premisa muchas veces olvidada: la ciencia y la tecnología son prácticas sociales, como cualquier otra. Es decir, no pueden considerarse aisladas de sus contextos y, lejos de ser una isla dentro de la sociedad sin posibilidad de interpelación por parte de ella, hoy, de manera inédita están en boca de todo el mundo. Los debates públicos, en redes sociales y medios de comunicación, pasaron de sólo informar resultados de “descubrimientos” científicos a debatir sobre métodos, formas, protocolos, discusiones, aciertos y equivocaciones.

Se produjo entonces, una mirada más profunda hacia dentro de los laboratorios, mirada que permite observar los mecanismos por los cuales la ciencia es ciencia. Sin embargo, de igual manera se pusieron sobre el tapete nuevos conceptos y palabras abstractas y técnicas, muy poco familiares para grandes sectores de la sociedad. Y aquí llegamos a lo que resulta problemático. Por un lado, vivimos en un mundo que nos bombardea de información por múltiples canales y medios, lo que se combina con intereses económicos y políticos de quienes la producen y difunden. Y por el otro, la interpretación de los mensajes queda sujeta a nuestras prenociones, preconcepciones y la experiencia previa que tengamos sobre el tema, por lo general relacionados con cargas emocionales e ideológicas. Esta mezcla de factores resulta en que la interpretación del mensaje redunde, paradójicamente, en mucha desinformación.

Estamos convencidas de que la comunicación pública de la ciencia es un instrumento fundamental para combatir la desinformación en todos los ámbitos. En este contexto, el desafío es seguir compartiendo cómo hacemos lo que hacemos, desde una mirada más integral y con las incertidumbres y cuestiones sin resolver que acompañan todo proceso científico. Es con este compromiso que acercamos una vez más nuestro aporte desde las Ciencias de la Tierra. Esta vez incorporando miradas desde otras disciplinas del saber científico. ¡Esperamos que disfruten este recorrido!

Gisela Morán, Emilia Sferco y Beatriz Waisfeld

índice



Amor a lo extremo

Los habitantes de la Laguna Negra

Por Cecilia Mlewski y Fernando G. Gómez

4



De detectives a soñadores

Tras las huellas del agua y el viento en las rocas

Por Cecilia del Papa y Jonathan Ledesma

20



De glaciares a desiertos

El ocaso de una Era

Por Andrea F. Sterren

40

actualidad

El Señor de los Anillos. El poder de la luz de Sincrotrón

Por Laura Borgnino y Gonzalo Bia

11

Incendios en la Provincia de Córdoba. La urgencia de un abordaje integral

Por Pedro Jaureguiberry, Juan P. Argañaraz y Melisa A. Giorgis

30

entrevistas a jóvenes en ciencia

Enrique A. Randolfe. Trilobites: la aventura de sobrevivir en el Paleozoico

18

Ariadna Coppa Vigliocco. ¿Un mar somero o una gigantesca laguna?

36

fichas técnicas

35

tomando conCiencia

Plantemos Nativas: plantemos “aromitos”

Por Sandra Gordillo

49

foto+ciencia

29 - 39

Recorridos que dejan huellas

Homenaje a paleontóloga cordobesa

38



Amor a lo extremo

Los habitantes de la Laguna Negra

**Cecilia Mlewski**

Dra. en Biología
Investigadora Adjunta
CONICET en IMBIV
(CONICET-UNC)

**Fernando G. Gómez**

Dr. en Ciencias Geológicas
Investigador Adjunto CONICET
en CICTERRA (CONICET-UNC)
Docente en la FCEFYN
Universidad Nacional de Córdoba

La búsqueda de vida fuera de nuestro planeta comienza, paradójicamente, en la Tierra, ya que es el único lugar en el que sabemos que existe vida, y donde sus características nos proporcionan un patrón para rastrear su posible existencia en otros lugares del universo. Desde un enfoque geológico y biológico, los científicos nos interesamos por las formas tempranas de vida, realizando un seguimiento de su evolución en la Tierra, tratando de definir los límites para su supervivencia y las señales que puedan haber dejado en el registro fósil.

¿Qué son los ambientes extremos?

¿Qué organismos podemos encontrar?

Una persona que viva en el caribe mexicano está acostumbrada al clima cálido y amigable y a la brisa del mar. Si le pidieran que se mude a Groenlandia por cuestiones de trabajo, posiblemente pensaría que es un cambio hacia un ambiente bastante extremo, en definitiva quizás esa persona no quiera que se le congele el daiquiri o el agua de coco que se está por tomar. Sin embargo un esquimal, quizás tenga una visión bastante diferente, pues su hábitat natural es el ártico.

Los ambientes extremos son hábitats que experimentan condiciones ambientales que constituyen un desafío para la mayoría de los seres vivos (más allá de un daiquiri congelado) y que involucran valores extremadamente altos o bajos de factores ambientales tales como salinidad, radiación ultravioleta, pH (grado de acidez) y temperatura. Así, algunos ejemplos pueden ser las altas presiones del fondo del mar, las fuentes hidrotermales con aguas a más de cien grados centígrados o lagunas de altura con concentraciones salinas altísimas y alta exposición a radiación ultravioleta. Desde hace algunas décadas se sabe que esos lugares no solo no son estériles, sino que albergan formas de vida perfectamente adaptadas, generalmente microbios y que conocemos como extremófilos.

Pero ¿por qué estas formas de vida prefieren ambientes tan adversos? Lo cierto es que para esas formas de vida esos ambientes no son adversos, sino todo lo contrario, ya que bajo esas condiciones encuentran su estado óptimo de crecimiento y desarrollo. Los extremófilos pueden definirse de diferentes maneras, según cuál sea el factor ambiental que se considera “extremo”. Por ejemplo, los microorganismos son considerados termófilos si soportan altas temperaturas, halófilos cuando soportan altas salinidades, acidófilos y alcalófilos cuando soportan niveles bajos o altos de pH (que define qué tan ácido o alcalino es un ambiente fluido, Figura 1).

Ahora, ¿para qué estudiar los extremófilos? En principio para comprender los mecanismos de adaptación a esas condiciones especiales que, quizás, encierren funciones celulares fascinantes y aún no conocidas. Asimismo, es útil saber en qué condiciones es capaz de desarrollarse y prosperar la vida en la Tierra y cuáles son sus límites. También para conocer mejor nuestros primitivos ancestros celulares, los ecosistemas y los metabolismos que predominaron durante los primeros tiempos de nuestro planeta; como hace más de 2.500 millones de años cuando existía una excesiva radiación UV debido a la falta de oxígeno y ozono. Por otro lado, conocer los límites de la vida permite entender qué otros ambientes fuera de nuestro planeta podrían albergarla, al menos la vida tal cual la conocemos. Por supuesto, no importa qué tan hostiles parezcan las condiciones ambientales desde nuestro punto de vista centrado en la Tierra. Una vida extraterrestre puede ser marcadamente diferente a lo que conocemos, pero aun así conocer los límites de la vida en la Tierra nos permite enfocar mejor nuestra búsqueda. Lo antes dicho nos lleva a hacernos preguntas fundamentales relacionadas a la vida en nuestro planeta tales como: cuáles son los límites de la vida, cómo se establecieron y evolucionaron los sistemas de obtención y transformación de energía para sostener la vida, o cuál es el origen de los ciclos biogeoquímicos de los ele-

mentos esenciales para la vida en la naturaleza. A su vez, comprender los organismos extremófilos tiene un gran potencial, pues nos puede ayudar a descubrir nuevas sustancias con interés biotecnológico producidas por estos microorganismos (ver CICTERRÁNEA 3, "Microorganismos extremófilos: potenciales héroes contra el Arsénico").

**¿Podemos conocer los límites de la vida?
¿Cuándo deja de ser habitable un ambiente? El estudio de la habitabilidad planetaria es de gran interés en la actualidad y ha sido el enfoque central de misiones espaciales en planetas como Marte, o en Europa, una de las lunas de Júpiter. Por eso, comprender la actividad biológica en ambientes extremos, y el registro que ésta deja en rocas y minerales es fundamental para comprender la vida antigua, ya sea en la Tierra o en otros planetas**

¿Podemos conocer los límites de la vida? ¿Cuándo deja de ser habitable un ambiente? El estudio de la habitabilidad planetaria es de gran interés en la actualidad y ha sido el enfoque central de misiones espaciales en planetas como



Figura 1. Ejemplos de lugares extremos en el mundo. Paleta de Pintor en Nueva Zelanda, corresponde a una zona de fuentes hidrotermales con temperaturas en sus aguas de más de 80°C (imagen de Christian Mehlführer, User:Chmehl - Trabajo propio, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3705012>). Isla James Ross en Antártida, presenta zonas con temperaturas frías extremas, así como otras zonas del continente Antártico. El Río Tinto en España se caracteriza por sus aguas muy ácidas. Chott el Djerid es un desierto con la mayor superficie salina del Sáhara, con temperaturas extremas y escasísima precipitación. *Créditos, Miriam García, Bethan Davies, Jorge Segura y Felipe Gómez

Marte, o en Europa, una de las lunas de Júpiter. Por eso, estudiar ambientes terrestres en todo un espectro de condiciones ambientales, permite entender mejor la información recolectada en estas misiones espaciales. Particularmente útiles son aquellos ambientes que presentan condiciones análogas a otros planetas, como por ejemplo Marte, que actualmente es frío, seco y con una alta radiación UV debido a su atmósfera delgada, pero que en su pasado distante se supone que fue cálido y húmedo, tal como registran las rocas sedimentarias de hace unos 4.000 millones de años. Por eso, comprender la actividad biológica en ambientes extremos, y el registro que esta deja en rocas y minerales, es fundamental para comprender la vida antigua, ya sea en la Tierra o en otros planetas.

La Puna Argentina

Los ecosistemas microbianos de la Puna Andina, se formaron durante el período geológico Terciario, comenzaron a elevarse hace unos 25 millones de años y están distribuidos en un área geográfica con altitudes que van desde los 3000 a los 6000 metros sobre el nivel del mar. Las lagunas de altura en esta región son ambientes muy poco explorados. Estos ecosistemas son únicos, no sólo por sus características geográficas y su variedad de ambientes extremos, sino también por su abundante biodiversidad microbiana.

Las comunidades microbianas que han evolucionado dentro de estos ecosistemas de altura toleran condiciones de estrés químico y físico tales como amplios rangos de salinidad, pH y/o temperatura, y han demostrado estar adaptados a elevados niveles de radiación ultravioleta, alcalinidad, sequedad, metales pesados (especialmente arsénico), y baja disponibilidad de nutrientes. La mayoría de estas lagunas sufren variaciones de temperatura de hasta 40°C entre el día y la noche. Su gran altura, una atmósfera permeable y la baja latitud en la que se encuentran permiten que las comunidades microbianas se encuentren expuestas a una alta incidencia de luz ultravioleta (hasta 165% superior a la que existe al nivel del mar). Por otro lado, debido a la baja presión de oxígeno, la presencia de rocas y fuentes hidrotermales de origen volcánico, la presencia de metales pesados (como el arsénico) y las características fisicoquímicas mencionadas, los ambientes de altura de la Puna Andina guardan ciertas similitudes con las condiciones ambientales que se piensa existieron en la Tierra Primitiva.

Por otra parte, las comunidades microbianas bentónicas (o sea, las que viven sobre el sedimento) que se encuentran



Figura 2. Arriba se retrata el paisaje característico de la Puna Andina. Abajo, se observa una imagen de la laguna de Socompa con sus característicos estromatolitos (círculo), a la derecha se muestra una ampliación de un sector de éstos.
*Créditos, M. E. Farias.

en estos lagos, están formadas por grupos de bacterias, cianobacterias (que pueden hacer fotosíntesis), microalgas (entre las que se encuentran las diatomeas) y otros orga-

Debido a la baja presión de oxígeno, la presencia de rocas y fuentes hidrotermales de origen volcánico, la presencia de metales pesados (como el arsénico) y los amplios rangos de salinidad, pH y/o temperatura, los ambientes de altura de la Puna Andina guardan ciertas similitudes con las condiciones ambientales que se piensa existieron en la Tierra Primitiva

nismos microscópicos que pueden interactuar con los sedimentos, dando lugar a matas microbianas que llevan a la formación de estructuras llamadas microbialitos. Los microbialitos son depósitos órgano-sedimentarios formados a partir de la interacción entre las comunidades microbianas bentónicas y los sedimentos detríticos o químicos. Éstos pueden presentar una variedad de morfologías externas y



Figura 3. Arriba, paisaje de la Laguna Negra con sus característicos oncolitos. Abajo, imagen de los diferentes tipos de matas microbianas, negras, verdesas y laminadas (de izquierda a derecha de la parte inferior de la imagen) que se pueden encontrar en la Laguna.

estructuras internas incluyendo estromatolitos y/o oncolitos.

Las matas microbianas son comunidades que forman una especie de alfombra continua, compacta en algunos casos laminadas, compuesta por diferentes comunidades de microorganismos. Muchas de estas comunidades microbianas, debido a su actividad metabólica, intervienen en procesos de atrapado de sedimentos y precipitación de minerales, particularmente de carbonatos, formando los estromatolitos. Los procesos microbiológicos y su relación con los factores ambientales quedan de alguna manera preservados en las texturas y señales geoquímicas observadas en los estromatolitos, por lo tanto, constituyen un excelente registro que vale la pena estudiar y comprender.

Ahondemos en los Estromatolitos...

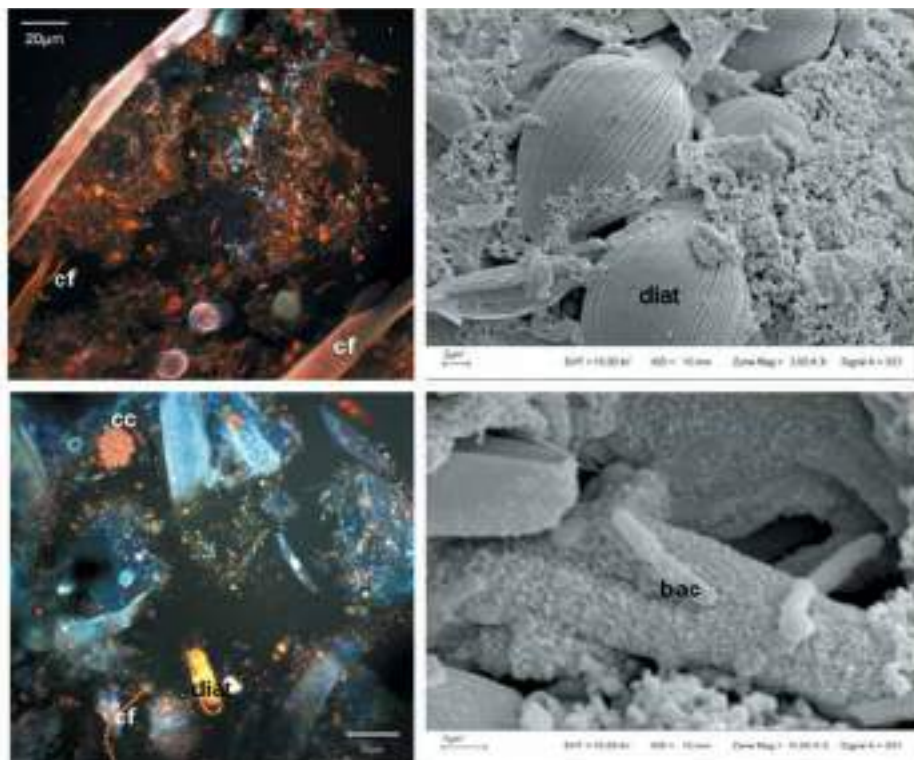
Según se ha documentado, los estromatolitos primitivos aparecieron en el registro fósil hace 3.500 millones de años y, por lo tanto, son la evidencia más antigua de presencia de vida sobre la Tierra. En la Era Precámbrica, que representa aproximadamente el 85% de la historia del planeta, los ambientes primitivos eran hostiles para albergar vida más compleja, tal como la que conocemos hoy. Por lo tanto, al estar adaptadas a esas condiciones, las comunidades microbianas bentónicas que originaron los estromatolitos pudieron dominar la superficie de la Tierra sin competencia. Su abundancia disminuyó drásticamente

hace unos 540 millones de años como consecuencia, en parte, de la aparición de los animales y los cambios en la química de los océanos.

Los estromatolitos primitivos aparecieron en el registro fósil hace 3.500 millones de años y, por lo tanto, son la evidencia más antigua de presencia de vida sobre la Tierra. Dado que los ambientes primitivos eran hostiles para albergar vida más compleja, tal como la que conocemos hoy, las comunidades microbianas que originaron los estromatolitos pudieron dominar la superficie de la Tierra sin competencia

En la actualidad todavía existen estromatolitos en la Tierra, pero en menor abundancia. Se los encuentra en algunas pocas localidades que suelen ser menos propicias para otras formas de vida, como los ambientes hipersalinos, alcalinos o sometidos a temperaturas extremas. Por lo general, existe una correlación entre su presencia y la ausencia de depredadores, como caracoles u otro tipo de animales que se alimentan de los productores primarios como las cianobacterias. Actualmente, algunas de las zonas donde existen estromatolitos son: Shark Bay (Australia),

Figura 4. Imágenes obtenidas con técnicas de microscopía de fluorescencia confocal (izquierda de la imagen, en color) y de microscopía electrónica de barrido (derecha de la imagen, en tonos de grises), donde se observan ciertos microorganismos asociados a las matas microbianas. Abreviaturas: bac, bacterias; cf, cianobacteria filamentosas; cc, cianobacteria en forma de cocos; diat, diatomeas.



Exuma Cays (Bahamas), en el océano Índico, en ambientes continentales como en el Parque Nacional Yellowstone (USA), en Laguna Salgada (Brasil), en el lago hipersalino Alchichica (México) y en numerosas lagunas como Socompa, Diamante, La Brava, y la Laguna Negra (Puna, Argentina, Figura 2).

Un caso particular, la Laguna Negra

La Laguna Negra forma parte del Complejo Salino de la Laguna Verde, localizada en la Puna de la Provincia de Catamarca, Argentina. Estudios realizados hasta ahora indican que la Laguna Negra es una salmuera rica en calcio, sodio y cloro. En las zonas costeras de la laguna, donde el agua de la misma se mezcla con las surgentes de agua subterránea, existe una región donde se encuentran abundantes matas microbianas asociadas a la precipitación de carbonatos, predominantemente calcita, formando estromatolitos y oncolitos.

La diversidad biológica en la Laguna Negra está representada principalmente por diferentes tipos de matas microbianas asociadas con los microbialitos. A simple vista se reconocen tres tipos principales de matas (Figura 3): matas negras (generalmente se localizan sobre los oncolitos parcialmente expuestos o formando parches dispersos), matas verdosas (generalmente costeras, son de color verde y se encuentran flotando con burbujas de gas superficial), y fi-

nalmente las matas laminadas o estratificadas (son las más abundantes en la laguna, se encuentran entre los oncolitos, presentan una coloración rosada a anaranjada en su superficie y la típica mata en capas de diferentes colores, dependiendo del tipo de comunidades microbianas que presentan).

En la Laguna Negra las condiciones ambientales registradas y el ambiente geológico se asemejan enormemente a las condiciones que se supone existieron durante el Precámbrico cuando la vida fue exclusivamente microbiana. A su vez, dado que se ha documentado la presencia de minerales carbonáticos en depósitos sedimentarios lacustres en Marte, la Laguna Negra tiene un gran potencial para comprender mejor estos depósitos y la posibilidad de que preserven algún tipo de señal de actividad biológica del pasado distante de Marte

Estudios del grupo de Geomicrobiología del CICTERRA permitieron conocer en parte la diversidad y estructura de las comunidades microbianas de estas matas. Utilizando



Figura 5. Analogías de la Tierra Primitiva con la Laguna Negra, mostrando paisajes muy similares (arriba), al igual que el paisaje del Planeta Marte y la Puna de los Andes, donde actualmente muchos grupos estudian e indagan estos ambientes por su similitud con el planeta rojo.

metodologías de vanguardia donde se analiza el material genético (ADN y ARN), se pudo observar la existencia de numerosos representantes bacterianos comúnmente observados en matas microbianas de sistemas hipersalinos, y un gran número de especies no identificadas con anterioridad, lo que destaca el potencial de estos sistemas poco explorados, pues es posible encontrar especies y metabolismos aún no descriptos. Las diatomeas, que son algas unicelulares, son comunes en todos los sitios analizados, mostrando así la importancia que poseen en estos ambien-

tencial para comprender mejor estos depósitos y la posibilidad de que preserven algún tipo de señal de actividad biológica del pasado distante de Marte (Figura 5).

RB **Referencias bibliográficas/
Lecturas sugeridas**

Microbial Ecosystems in Central Andes Extreme Environments. Springer Nature Switzerland AG (2020). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36192-1>
<https://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy128/Labios-feraprimtiva.pdf>
<https://unciencia.unc.edu.ar/sin-categoria/un-lugar-para-estudiar-la-tierra-primitiva/>
<https://www.infobae.com/america/tendencias-america/2021/04/04/marte-en-la-argentina-cientificos-estudian-sistemas-sedimentarios-del-pais-analogos-al-planeta-rojo/>

G **Glosario**

Ecosistema: es un sistema biológico constituido por una comunidad de organismos vivos y el medio físico donde se relacionan. Se trata de una unidad compuesta de organismos interdependientes que comparten el mismo hábitat.

Matas Microbianas: son consorcios microbianos compuestos por grupos de microorganismos que generalmente tienen una estructura interna formada por bandas o capas (a escala del milímetro a centímetro) producto de que diferentes grupos de organismos se distribuyen en distintos niveles o capas debido a la presencia de gradientes químicos, de iluminación, disponibilidad de nutrientes, etc.

Estromatolito: estructura órgano-sedimentaria laminada, formada por el atrapado y fijación de partículas sedimentarias y la precipitación de minerales (generalmente carbonatos).

Oncolito: estructura órgano-sedimentarias como los estromatolitos pero de forma redondeada y con laminación interna es concéntrica. Son una variedad de estromatolito.

EL SEÑOR DE LOS ANILLOS

EL PODER DE LA LUZ DE SINCROTRÓN

LAURA BORGNINO Y GONZALO BIA

¿Qué tienen en común estas historias?

1

Rembrandt utilizó un componente desconocido en tres de sus obras maestras para lograr el relieve de las figuras que aparecen en sus pinturas. El ingrediente misterioso es la plumbonaerita, una clase de mineral que no se usaba en aquella época. Rembrandt modificó los materiales de su pintura intencionalmente mediante el agregado de óxido de plomo al aceite, convirtiendo la mezcla en una pintura similar a una pasta.



Susanna y los ancianos

2

Logran leer papiros quemados por el Vesubio, de hace 2100 años. Estos rollos de papiro fueron descubiertos entre 1752 y 1754, durante excavaciones en Herculano. En 1802, seis de ellos fueron regalados por el rey de Nápoles a Napoleón Bonaparte, que los entregó a la biblioteca del Instituto de Francia con la misión de leerlos, fracasando en dos intentos (1817 y 1877). En 1986 un método de desenrollado permitió despegar uno de ellos, roto en varios cientos de fragmentos, muy difíciles de leer. Finalmente, mediante una imagen en tres dimensiones de muy alta resolución, sin tener que destruir, abrir o manipular los pergaminos, los mismos han podido ser descifrados.



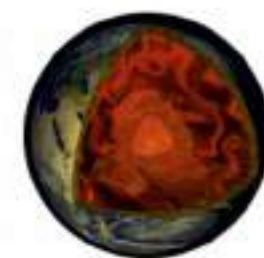
3

Descifran la arquitectura tridimensional de una proteína específica del SARS-CoV-2, la cual está precisamente involucrada en la extraordinaria multiplicación del virus. Los resultados proporcionan puntos de partida concretos para el desarrollo de ingredientes activos. Estos podrían apuntar específicamente a puntos débiles en la macromolécula y dificultar su función, es decir, paralizar la gran capacidad de propagación del virus.



4

Revelan que el centro metálico de nuestro planeta, a 3.000 kilómetros por debajo de la superficie, también contiene silicio, un elemento que se encuentra comúnmente en los meteoritos rocosos. El hallazgo, recreado bajo condiciones extremas de estudio, apoya la teoría que sugiere que la formación de la Tierra, hace unos 4.500 millones de años, fue impulsada por interacciones entre meteoritos pedregosos, ricos en hierro, dentro de una nube de polvo y gas.



En todos los casos se utilizó luz de sincrotrón

A finales del siglo XX comenzó una ambiciosa carrera mundial orientada al desarrollo de enormes instalaciones de aceleradores de partículas, con el objetivo de utilizar la luz de sincrotrón generada allí para el desarrollo de nuevas técnicas de análisis. Tales proyectos implicaron una inversión millonaria y la colaboración internacional de grupos multidisciplinarios, que en algunos casos involucran varios países.

A lo largo de la historia, la humanidad ha revolucionado el conocimiento científico y tecnológico con descubrimientos que han tenido un gran impacto en la calidad de vida del ser humano. El siglo XX trajo un nuevo hallazgo que en las últimas décadas comenzó a expandirse por el mundo científico fuera del área de la física: *la luz de sincrotrón*. Durante siglos, el hombre había estado observando radiación sincrotrón de estrellas o galaxias, sin saber que la luz provenía de la aceleración de partículas elementales en los grandes campos magnéticos asociados a objetos astronómicos. Sin embargo, y como muchas veces ocurre en la ciencia, su descubrimiento en el laboratorio fue por casualidad. En 1947, trabajando en un acelerador de electrones en el laboratorio de investigación de General Electric (Estados Unidos), los científicos Hebert Pollock y Robert Langmuir se dieron cuenta de que, mientras intentaban acelerar al límite los electrones,

Durante siglos, el hombre había estado observando radiación sincrotrón de estrellas o galaxias, sin saber que la luz provenía de la aceleración de partículas elementales en los grandes campos magnéticos asociados a objetos astronómicos

se producían unas chispas intermitentes. En un primer momento, vieron ese efecto como un inconveniente, ya que las partículas perdían energía, pero luego comprobaron que se trataba de una radiación totalmente nueva. No fue hasta una década después que comenzaron a encontrarle utilidad a esos rayos X espontáneos generados por la luz de sincrotrón. Este hecho desató una revolución en el campo de la ciencia y la tecnología, pero, por sobre todo, abrió la puerta para que otros científicos de otras disciplinas empezaran a explorar el uso de la luz de sincrotrón. Con el tiempo, más científicos se entusiasmaron y continuaron trabajando, descubriendo nuevas aplicaciones y técnicas de análisis en

diversas áreas como la química, la medicina, la farmacia, la paleontología, la antropología, entre otras. El sincrotrón fue abriendo sus puertas a un mundo que solo era imaginado para físicos, dando inicio a una revolución de ideas en donde, en menos de una década, sus usuarios cambiarían de perfil radicalmente. El sincrotrón ha generado beneficios de grandes dimensiones para la ciencia en general, para la industria, para la academia, para los propios investigadores y para la sociedad en su conjunto.

¿Qué es un sincrotrón?

Los *sincrotrones* implican un conjunto de instalaciones e infraestructura científica (edificios, equipos, laboratorios, áreas administrativas, etc.) que operan tecnologías de punta y donde se realiza una variedad de experimentos multidisciplinarios. Dentro de las instalaciones, se encuentra *el anillo* de gran dimensión (entre 300 m y 3 km de circunferencia) donde se produce *la luz de sincrotrón*. Si bien es posible construir sincrotrones de mayor dimensión, la relación costo-beneficio no lo justifica. Los sincrotrones se clasifican en primera, segunda, tercera y cuarta generación. La evolución en las generaciones tiene que ver con la brillantez de la luz que se produce en el anillo. Por ejemplo, recién en la década del 90, se logró generar luz millones de veces más brillante que el sol. Los sincrotrones de estas características son de tercera generación y, junto con los de cuarta generación, son los más habituales. La luz de sincrotrón posee características particulares que la diferencian de cualquier otra radiación (Figura 1), lo que permite estudiar fenómenos

Sincrotrones en el mundo

En la actualidad existen alrededor de 50 sincrotrones en funcionamiento, distribuidos en poco más de 20 países. Casi la mitad se concentra en sólo tres países: Japón con 9, Estados Unidos con 7 y Alemania con 6. Sólo uno se encuentra en Sudamérica (Campinas, Brasil) y tiene el nombre de Sirius. Es de cuarta generación y tendrá, por ahora, sólo dos competidores directos: una fuente de luz en Suecia y otra que comenzará a desarrollarse en Francia. Aparte de las mencionadas, otras 13 de cuarta generación se están planificando.

a escalas atómicas y moleculares. Gracias a la luz de sincrotrón, se pueden llevar a cabo experimentos que permiten descubrir los secretos de la materia, desde la estructura tridimensional de una proteína hasta las características de una obra de arte.

¿Cómo funciona un sincrotrón?

Todo comienza en un trozo de metal y de allí, ¡a girar! Cuando un metal se calienta demasiado (por ejemplo, por encima de los 1000 °C), los electrones de su interior se mueven tan rápido que pueden desprenderse del mismo (1, Figura 1). Una vez liberados, los electrones son forzados a viajar en círculo a altas velocidades, ayudados por electroimanes muy poderosos que los hacen girar. Esto ocurre en el *acelerador lineal* (2, Figura 1), donde los electrones alcanzan el 99% de la velocidad de la luz. Allí se produce la luz de sincrotrón. Desde ese punto la luz es dirigida al anillo más grande (3, Figura 1), denominado *anillo de almacenamiento*, para finalmente ser utilizada en los laboratorios (4, Figura 1). Cada laboratorio se denomina “línea de experimentación” (*beamlines*) y cuenta con instrumentación específica de medición, de acuerdo al tipo de experimento que se desea llevar a cabo (Figura 2). Un sincrotrón típico puede tener entre 10 a 50 *beamlines*. La luz de sincrotrón también se la llama “luz blanca”, ya que está compuesta tanto por luz visible como por otras radiaciones que no son visibles al ojo humano. Así, un amplio rango

La luz de sincrotrón es un tipo de luz emitida por electrones, o partículas cargadas, que giran dentro de un anillo a velocidades cercanas a la de la luz y con muy alta energía

de frecuencias compone la luz de sincrotrón: desde ondas de radio, micro-ondas, luz infrarroja (IR), ultravioleta, rayos X (suaves y duros) (Figura 2). Cada línea de experimentación está configurada para filtrar solo una frecuencia específica de radiación que se aplicará a una técnica en particular. Los rayos X son los más usados porque su longitud de onda está en el orden del tamaño de los átomos, y por lo tanto permite hacer estudios a ese nivel. Las técnicas sincrotrón son rápidas, focalizadas y con alta resolución.

Te sugerimos que veas este video muy didáctico del sincrotrón ALBA (Sincrotrón: la más grande máquina de rayos X de España: <https://www.youtube.com/watch?v=bwOCq4xzahA&feature=youtu.be>)

¿Para qué sirve un sincrotrón y qué técnicas se desarrollan?

La luz de sincrotrón tiene múltiples aplicaciones. En general, se utiliza para explorar la composición, propiedades y estructura de los materiales a nivel atómico o molecular.

Algunas características de la luz de sincrotrón

- ❖ **Brillantez:** Brillantez es la cantidad de energía luminosa por unidad de tiempo. La luz de sincrotrón es más de un millón de veces más brillante que la del sol. En una fuente de luz de sincrotrón una baja emisión del rayo de luz significa que los rayos X producidos serán pequeños y esto resultaría en una mayor brillantez. La brillantez permite más precisión en los resultados. A mayor brillantez se pueden estudiar mejor y más rápido las muestras.
- ❖ **Alta intensidad y alta colimación:** Adecuada para experimentos en donde se disponen de muestras pequeñas.
- ❖ **Polarizada:** La polarización es muy útil para estudiar la estructura de las moléculas.
- ❖ **Amplio espectro de frecuencia:** El espectro de radiación de los electrones que se mueven en el anillo es un continuo que va desde infrarrojo hasta rayos X de alta energía.
- ❖ **Pulsado estructural temporal:** Es producida en pulsos del orden de picosegundos (de 100 billonésimas de segundo de duración). Esto permite captar con gran detalle el desarrollo temporal de procesos biológicos, químicos o físicos de gran complejidad que pudieran ser demasiado breves o demasiado rápidos para ser estudiados con otros métodos.

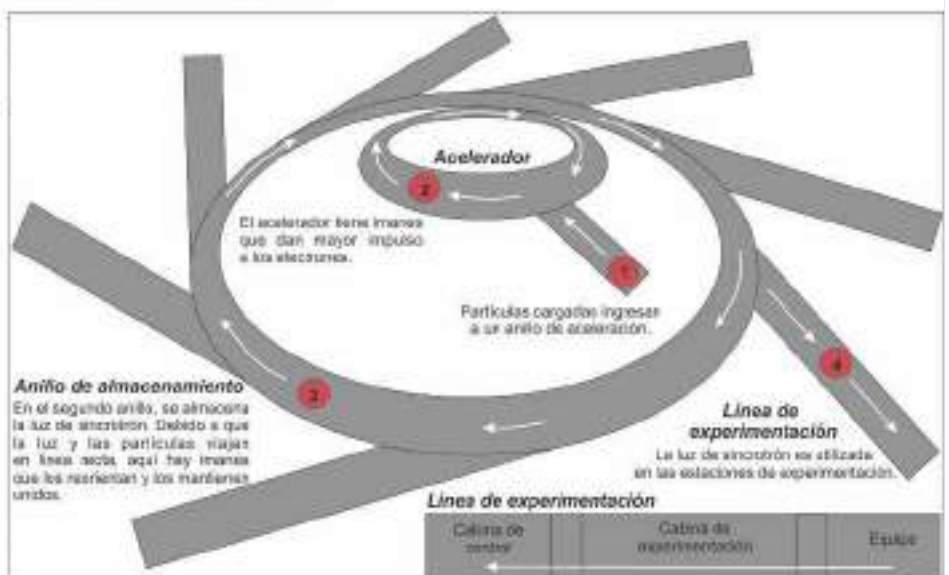


Figura 1: Esquema simplificado del funcionamiento de un sincrotrón. Propiedades de la luz generada.

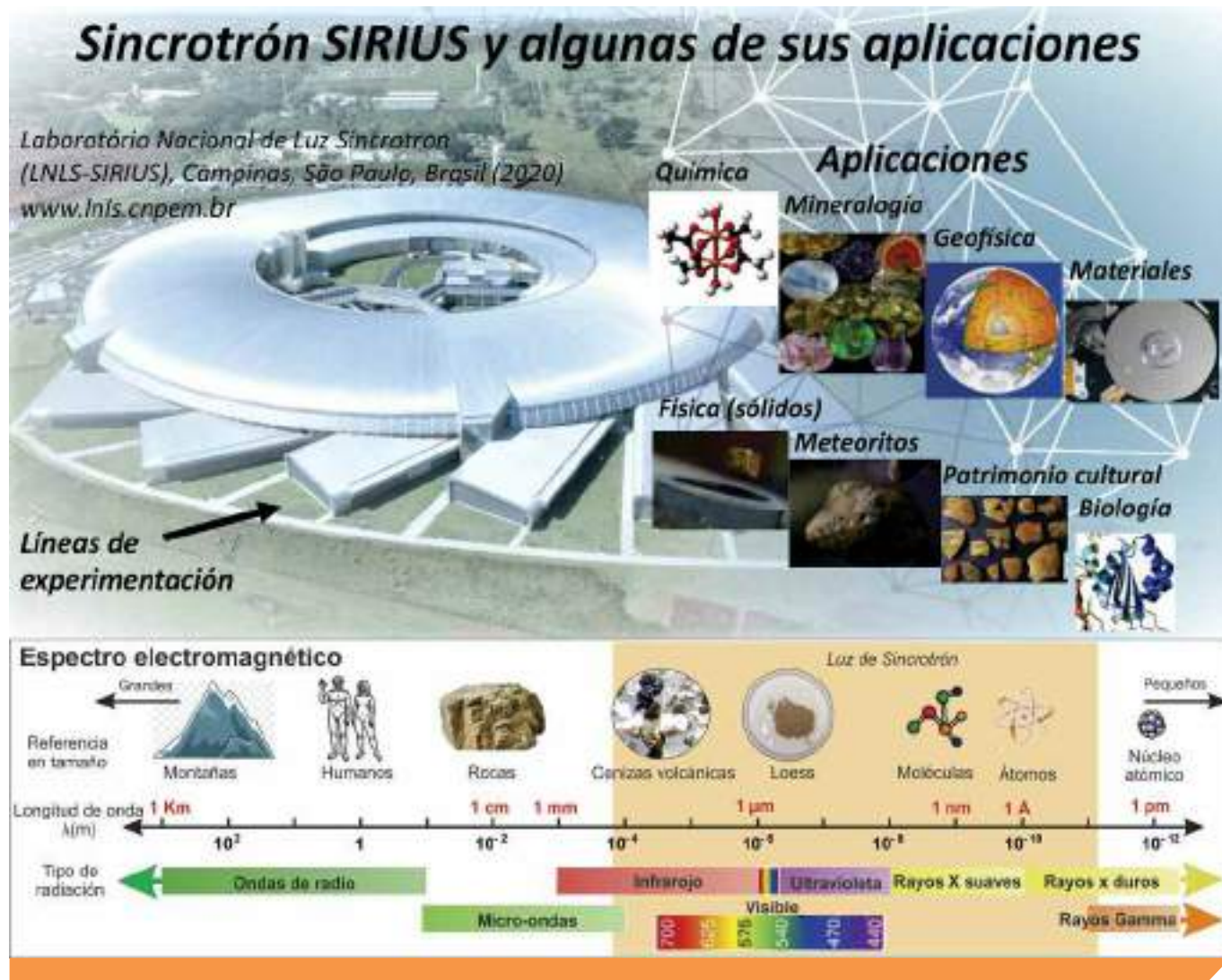


Figura 2: Sincrotrón SIRIUS y sus aplicaciones (imagen obtenida de <https://www.lnls.cnpem.br/>)

Se utilizan tres técnicas básicas:

- 1) *Microscopía*: utiliza el haz de luz para obtener imágenes con elevada resolución.
- 2) *Dispersión/Difracción*: utiliza los patrones de luz producidos cuando los rayos X son desviados por la red de átomos de los sólidos, permitiendo determinar la estructura de cristales y moléculas grandes, como proteínas.
- 3) *Espectroscopía*: utilizada para estudiar las energías de las partículas que son emitidas o absorbidas por muestras expuestas al haz de luz. Es comúnmente utilizada para determinar las características de los enlaces moleculares y el movimiento de electrones.

¿Y nosotros, para qué podemos usarla?

Una cuestión importante a tener en cuenta en el área de las ciencias de la Tierra, es que las muestras naturales

son heterogéneas y, por lo tanto, las técnicas de análisis deben ser capaces de ofrecer información con buena resolución y detección sobre granos pequeños o sobre diferentes zonas de la muestra. Una matriz heterogénea, además, suele comprometer la relación señal/ruido, ya que, en muchos casos, la matriz enmascara la señal del elemento a medir. Asimismo, muchos procesos naturales ocurren (u ocurrieron) a altas presiones y temperaturas, siendo lo ideal reproducir esas mismas condiciones en el laboratorio (ej: estudios de minerales bajo condiciones extremas de presión y temperatura). La identificación de elementos traza es otro problema que no siempre puede resolverse con el uso de técnicas convencionales. Todos estos inconvenientes se ven reflejados en señales analíticas de baja calidad, ausencia de señal para elementos en muy baja concentración o imágenes con baja resolución. La cantidad de muestra a analizar (y los tratamientos previos destructivos de la muestra) es

otra dificultad típica en técnicas convencionales. Sin embargo, todos estos problemas pueden ser superados con el uso de la luz de sincrotrón.

En el siguiente cuadro, se resumen algunas técnicas, sus usos y ejemplos aplicados al campo de las ciencias de la Tierra. Actualmente, la mayoría de los sincrotrones reúnen varias técnicas en una sola *beamline* (ver más arriba). Por ejemplo, en el nuevo SIRIUS (Campinas, Brasil) la línea EMA (Extreme condition X-ray Methods of Analysis, o Análisis con rayos X en condiciones extremas) trabajará en condiciones extremas de presión y temperatura pudiendo

aplicarse allí las técnicas de DRX (Difracción de rayos X) y XAS (Espectroscopía de absorción de rayos X), entre otras. Otro ejemplo es CARNAUBA donde las técnicas XAS, DRX y FRX (Espectroscopia de Fluorescencia de rayos X) están unificadas en la misma línea. Claramente, el uso de la luz de sincrotrón es el método más adecuado y más potente para estudiar procesos y materiales a escala atómica que requieren de gran sensibilidad analítica y condiciones extremas de estudio. Su aplicación en el área de las ciencias de la Tierra es un gran desafío, con resultados alentadores y muy prometedores.

Uso de la luz de sincrotrón en Ciencias de la Tierra		
Técnicas	Uso	Ejemplos
<i>Difracción de rayos X (DRX)</i>	Determina la estructura cristalina de minerales.	Identificación de microcristales naturales.
<i>DRX en condiciones extremas de alta presión y temperatura (HP/HT)</i>	Determina cambios estructurales de materiales sometidos (<i>in-situ</i>) a altas temperaturas y presiones.	Estudios estructurales de fases minerales que son estables en el manto y núcleo de la Tierra.
<i>Espectroscopía de absorción de Rayos X (XAS)</i>	En los datos XAS se analizan dos regiones, cada una aporta información diferente: <i>Región XANES (o región cercana):</i> determina estado de oxidación de un elemento. <i>Región EXAFS (o región lejana):</i> determina el entorno químico local del elemento en estudio. Muy útil para estudiar la estructura de materiales donde el análisis por difracción no es aplicable (materiales amorfos, soluciones, líquidos y polímeros).	Especiación de arsénico en vidrio volcánico. Identificación de elementos traza en minerales.
<i>Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX)</i>	Identifica elementos químicos, su distribución en la muestra (mapping) y asociaciones con otros elementos.	Presencia y distribución espacial de hierro, arsénico y potasio en granos del mineral jarosita, en muestras de residuos mineros. Identificación de inclusiones de fluidos y fundidos dentro de cristales. Identificación de volátiles en vidrios y minerales.
<i>Dispersión de rayos X de bajo ángulo (SAXS)</i>	Determina el tamaño de partículas en muestras no homogéneas y estructura amorfa. (ej.: materiales porosos).	Estructura de suspensiones de arcillas (espesor y espaciado interbasal hidratados) y tamaño de partículas de fractales (ej.: suelos).
<i>Tomografía de rayos X</i>	Obtención de imágenes y reconstrucción tridimensional de la estructura de un objeto.	Análisis de las características internas de fósiles, rocas, meteoritos. Estudios de porosidad y permeabilidad de rocas.

El uso de la luz de sincrotrón es el método más adecuado y más potente para estudiar procesos y materiales a escala atómica que requieren de gran sensibilidad analítica y condiciones extremas de estudio. Su aplicación en el área de las ciencias de la Tierra es un gran desafío, con resultados alentadores y muy prometedores

¿Y por casa cómo andamos?

Argentina cuenta con una comunidad de usuarios de sincrotrones muy bien establecida, los cuales pertenecen principalmente al área de la química y la física, siendo el área de las ciencias de la Tierra muy poco explotada hasta el momento. En el CICTERRA se ha comenzado a utilizar la luz de sincrotrón en el análisis de materiales geológicos.

En particular, los investigadores del grupo Geoquímica Ambiental ya han realizado varias estadías en el Laboratorio Nacional de Luz Sincrotrón (LNLS-Brasil). Se ha trabajado con diferentes muestras naturales, tales como cenizas volcánicas, residuos mineros, muestras de salares, travertinos, carbonatos biogénicos y sedimentos loésicos, en todos los casos con el objetivo de identificar el estado de oxidación y el entorno químico del arsénico (Figura 3).

¿Por qué nos interesa este elemento?

El arsénico es un contaminante de origen natural con alto impacto en la salud de la población, tanto de Argentina como de otras regiones del mundo (en nuestro país hay regiones con concentración de arsénico en agua para consumo que alcanzan más de 10 veces el valor recomendado). Por tal motivo, conocer su concentración en el agua es un primer paso importante, ya que permite identificar regiones con potencial riesgo de contaminación. Sin embargo, es clave también conocer cómo se encuentra el arsénico en la fuente natural de la que deriva. Esto es así porque la peli-



Figura 3: Evidencias del Arsénico en diferentes entornos químicos en muestras naturales.

grosidad de un contaminante depende no solo de la cantidad presente en el medio ambiente, sino también de su estado de oxidación (las especies de arsénico (III) son más tóxicas que las de arsénico (V)) y de la capacidad de estar disponible para los seres vivos. Tal disponibilidad está directamente vinculada con la forma en que se encuentra en su fuente natural, es decir: ¿cuál es el estado de oxidación del arsénico en la fuente natural?, ¿cómo se coordina dentro de la red mineral que lo contiene?, ¿se encuentra adsorbido en superficie o formando parte de la estructura interna del mineral?. Por ejemplo, si el arsénico está asociado a compuestos que contienen azufre, hierro o carbonatos (ej.: arsenopirita, óxidos de hierro (III) y carbonato de calcio) su liberación será relativamente rápida, ya sea por disolución o desorción, y requerirá cambios en la acidez del medio ambiente y/o presencia de microorganismos para liberarse.

Sin embargo, cuando el arsénico se encuentra en el interior de una red de silicatos (ej.: en vidrios volcánicos), se liberará luego de varios años, debido a que los silicatos son más difíciles de alterar. *Por lo tanto, conocer cómo se encuentra el arsénico en la fuente natural es sumamente importante para comprender cómo se libera al medio ambiente.*

¿Cómo se analiza?

No es una tarea sencilla. Aquí necesitamos realizar desde experiencias de laboratorio para evaluar la liberación del arsénico desde su fuente natural, hasta análisis más complejos que requieren del empleo de luz de sincrotrón y otras técnicas convencionales, para identificar cómo y con qué elementos se encuentra el arsénico en la fuente natural que lo contiene.

Laura Borgnino

Dra. en Química, Investigadora Independiente del CONICET en CICTERRA (CONICET, UNC), Docente en la FCFyN Universidad Nacional de Córdoba



Gonzalo L. Bia

Dr. en Ciencias Geológicas, Investigador Asistente del CONICET en CICTERRA (CONICET, UNC), Docente en la FCFyN, Universidad Nacional de Córdoba



Glosario

Elemento traza: desde el punto de vista analítico, un elemento traza es aquel que se encuentra en muy baja concentración (inferior a 100 microgramos por gramo).

Espectroscopía: es el estudio de la interacción de la radiación electromagnética con la materia.

Entorno químico o geometría molecular: es la disposición tridimensional de los átomos que constituyen una molécula. Este entorno está descrito por la cantidad de átomos vecinos al átomo central (número de coordinación) y la longitud y ángulo de enlace entre dos átomos que están unidos entre sí.

Adsorción: adhesión de átomos, iones o moléculas provenientes de un gas, un líquido o un sólido disueltos en la superficie de un material (primeros nanómetros).

Desorción: es el proceso mediante el cual átomos, iones o moléculas retenidas en la superficie de un material son liberados de la misma. Proceso opuesto a la adsorción.

Referencias Bibliográficas/ Lecturas sugeridas

The discovery of synchrotron radiation:
Am. J. Phys., Vol. 51, No. 3, 1983

Sincrotrón SIRIUS-LNLS:
<https://www.lnls.cnpem.br/en/>

Sincrotrón ALBA:
<https://www.cells.es/es/que-es-alba/bienvenida>

Jóvenes en Ciencia

Enrique Randolfe es Licenciado en Paleontología, egresado de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente, es estudiante del Doctorado en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en la Universidad Nacional de Córdoba con una beca doctoral del CONICET en el CICTERRA (CONICET, UNC).



Su línea de investigación es sobre un grupo de artrópodos fósiles, los trilobites, particularmente los miembros de la familia Dalmanitidae. Ésta consiste en analizar la aparición de rasgos defensivos durante el período Devónico y observar su relación con la Revolución Marina del Paleozoico Medio. Para esto, bajo la dirección del Dr. Juan José Rustán y del Dr. Arnaud Bignon, lleva a cabo la reconstrucción de hipótesis de relaciones de parentesco entre los grupos (filogenia) para dilucidar si existió alguna tendencia en los cambios evolutivos en función de la ecología de los trilobites.

TRILOBITES

LA AVENTURA DE SOBREVIVIR EN EL PALEOZOICO

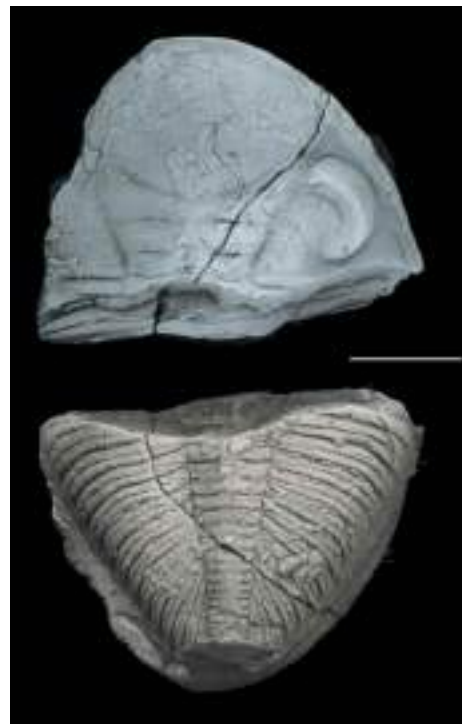
Sabemos que los trilobites son muy comunes en el registro fósil, ¿Nos contás acerca de ellos? ¿Qué particularidades tenían? ¿Dónde y cuándo vivieron? ¿Y dónde los encontramos hoy?

Con respecto a la última pregunta, lamentablemente no se los puede encontrar en ningún lado hoy, al menos vivos, ya que se extinguieron completamente al final del Paleozoico, hace 250 millones de años, pero ya venían de capa caída desde hace un tiempo. Justamente a mediados del Devónico (hace cerca de 340 millones de años) es cuando se extinguen casi todos los grupos de trilobites que había.

Como todos los artrópodos (grupo que incluye, por ejemplo, arañas, alacranes y cangrejos) tenían el cuerpo cubierto por un exoesqueleto segmentado y articulado. Lo interesante es que este caparazón estaba completamente calcificado en el dorso y esto facilitó mucho la fosilización, incluso los ojos estaban calcificados. Los ojos compuestos de los trilobites están entre los sistemas visuales más antiguos que se conocen. Había trilobites muy variados: nadadores (que se cree que podían cazar), otros flotaban, algunos habitaban directamente sobre el fondo, los había con espinas enormes o casi lisos. Incluso, hasta hace poco se creía que eran animales exclusivamente marinos, pero gracias a un trabajo reciente de investigadores del CICTERRA, parece que también llegaron a habitar ambientes de agua salobre. Siendo tan exitosos, variados y de fácil fosilización, se los puede encontrar como parte del registro fósil del Paleozoico de prácticamente todo el mundo.

¿Qué significa reconstruir la filogenia? ¿Cuáles son los pasos a seguir y por qué es tan importante?

La filogenia es una hipótesis de relaciones de parentesco del grupo que se estudia, graficada en forma de árbol, cuyas ramas más cercanas representan a los grupos más cercanamente emparentados entre sí. Para construirla primero defino una serie de características morfológicas (por ejemplo largo de la cabeza, número de anillos en la cola, tamaño de los ojos) que considero importantes y que no varíen dentro de cada especie, y hago una base de datos de esas características para cada trilobite que voy a



estudiar. Esa base la analizo mediante una metodología llamada Cladística, que obtiene el árbol evolutivo que requiere menos pasos (cambios) para explicar la distribución de esas características en todo el grupo. Teniendo una filogenia bien construida se pueden analizar las características de los trilobites en el tiempo, ya no viendo a cada especie estudiada sino al linaje del que forman parte y a sus ancestros hipotéticos. Por ejemplo, se puede estimar cuántas veces se desarrollaron espinas en el grupo o si hubo un aumento de tamaño general y cuándo, aproximadamente, ocurrieron estos cambios.

La Revolución Marina del Paleozoico Medio es un hito espectacular en la historia de la vida. ¿Podés contarnos sintéticamente en qué consiste y por qué tu investigación es clave para entender mejor este episodio?

Básicamente fue un "boom" en el desarrollo de depredadores marinos, acompañado de una respuesta evolutiva en los grupos presa para defenderse (ver CICTERRÁNEA 2, "La Revolución Marina del Paleozoico Medio"). Cuando digo depredadores, hablo de potenciales depredadores para trilobites, como cefalópodos y peces, que empezaron



a ser mucho más activos y especializados que antes. Este “boom” evolutivo se produjo como resultado de un mayor ingreso de nutrientes en el océano, en gran medida por el desarrollo de las plantas que por un lado aportaron contenido orgánico, pero también meteorizaron las rocas contribuyendo con mayor cantidad de nutrientes inorgánicos. Esto permitió una diversificación en todos los eslabones de la cadena alimenticia como jamás se había visto antes. Estudiar a los trilobites en este contexto de diversificación de los depredadores es muy interesante ya que hasta ahora solo se han estudiado animales presa que vivían fijos, adheridos al fondo del mar. Los trilobites, además de tener el potencial para desarrollar estructuras de defensa como espinas, también podían moverse, y eso permite que se puedan estudiar comportamientos relacionados con defenderse, escapar o esconderse, algo de lo que se sabe poco en animales extintos.

Durante tu carrera para ser paleontólogo, ¿Te imaginabas estudiando invertebrados fósiles?

No, para nada. Creo que como muchos

arranqué por ver Jurassic Park y querer ser paleontólogo para estudiar dinosaurios, pero a medida que fui avanzando vi que otras cosas me gustaban más. Para el final lo que más me interesaba era estudiar algo vinculado con el reino animal (con perdón de las plantas, pero nunca me interesaron) y realizar alguna clase de estudio evolutivo, para entender cómo es que han cambiado los seres vivos en el tiempo. En muchos grupos de invertebrados los caparzones son lo único que se conoce bien, ya que es lo que fosiliza fácilmente, y a veces varían mucho por cuestiones ambientales. Por eso se los ha dejado de lado para estudios evolutivos, pero en el último tiempo han salido cada vez más trabajos que estudian su evolución. Todavía queda mucho para hacer y las metodologías mejoran continuamente, por lo cual es muy interesante contribuir a que haya más estudios evolutivos con invertebrados.

Sabemos que el trabajo y la tesis te deben demandar mucho tiempo, pero nunca hay que dejar de lado el ocio. ¿Qué otros intereses

y pasatiempos tenés en tus ratos libres?

Me gusta mucho juntarme con amigos y familia. En general disfruto mucho leer de todo un poco, sobre todo fantasía. Y uno de mis mayores pasatiempos son los juegos de mesa. Hay muchos que están buenísimos y no son muy conocidos.

Para finalizar esta pequeña entrevista, seguramente te pusiste a pensar cuántas puertas se abren en el mundo de la ciencia... ¿Cómo te imaginás y qué cosas te gustaría hacer en los tiempos que se vienen?

Una vez terminada la Tesis, me gustaría seguir contribuyendo a la ciencia argentina, por lo que seguramente me presentaré a una beca posdoctoral. Con la situación actual es difícil asegurar cómo seguirá todo, pero espero que las decisiones políticas en relación a la ciencia mejoren. Con respecto al tema de investigación, estoy muy interesado en seguir explorando la Revolución Marina del Paleozoico Medio. Creo que es algo de lo que se habla mucho pero que todavía falta mucho para hacer.

DE DETECTIVES A SOÑADORES



Cecilia del Papa
Doctora en Geología
Investigadora Principal
CONICET en CICTERRA
(CONICET-UNC)



Jonathan Ledesma
Licenciado en Geología
Becario CONICET en CICTERRA (CONICET-UNC)
estudiante de Doctorado en Ciencias Geológicas
FCEfN, Universidad Nacional de Córdoba



La mayoría de las personas estamos mal acostumbradas a que los trabajos sean tangibles, por ejemplo: cavar una zanja, curar una enfermedad, litigar en un juicio, enseñar. Incluso en geología si alguien dice que estudia dinosaurios, busca agua dulce o minerales, resulta más fácil... Pero mirar hacia el pasado buscando paisajes... es otra historia. Aunque no lo imaginamos, nuestras vidas transcurren, de un modo u otro, ligadas a paisajes antiguos...

Tras las huellas del agua y el viento en las rocas

Entre las tareas que realizan los geólogos centrados en el estudio del planeta Tierra, está la de reconstruir el paisaje pasado (desde unos pocos de cientos de años a millones de años atrás) y cómo este paisaje fue cambiando con el tiempo. En otras palabras, trata de conocer cómo se distribuían los océanos y los continentes a lo largo de la historia de la Tierra. Pero solo esto no es suficiente, tenemos que descubrir si había cordones montañosos o llanuras; si las llanuras tenían vegetación; cómo eran los ríos y en qué dirección corrían; ¿Los lagos tenían agua dulce o salada?; ¿Los mares eran profundos, de aguas cristalinas?. Aunque parezca increíble se pueden responder estas preguntas a partir de aplicar varios métodos o herramientas, entre ellos, el estudio de las rocas sedimentarias.

Este tipo de rocas llamadas “sedimentarias” se generan en la superficie de la Tierra, ya sea sobre los continentes o bajo el fondo de mares y océanos. Se forman a partir de “sedimentos”,

y estos, en su mayoría, se producen por la destrucción de rocas anteriores (Figura 1). El agua, el viento, las plantas y animales ayudan a romper las rocas que se encuentran en la superficie de la Tierra. De acuerdo al tamaño de las partículas en los que las rocas se desintegran se agrupan en tres categorías principales: gravas, arenas y fango (Figura 2). Estos fragmentos de rocas, si son lo suficientemente pequeños, pueden ser movidos o transportados por el agua o el viento.

Cuando esto sucede, el sedimento se traslada y se acumula en fondos de ríos, lagos y océanos. Al hacerlo, el agua (ya sea en forma de lluvia, corrientes en un río o las olas del mar) y el viento dejan marcas en el sedimento que luego quedan grabadas en las rocas sedimentarias. Los animales y plantas que crecen sobre el suelo o viven en el océano también dejan su rastro en las rocas, pero ahora nos vamos a enfocar en el agua y en el viento.

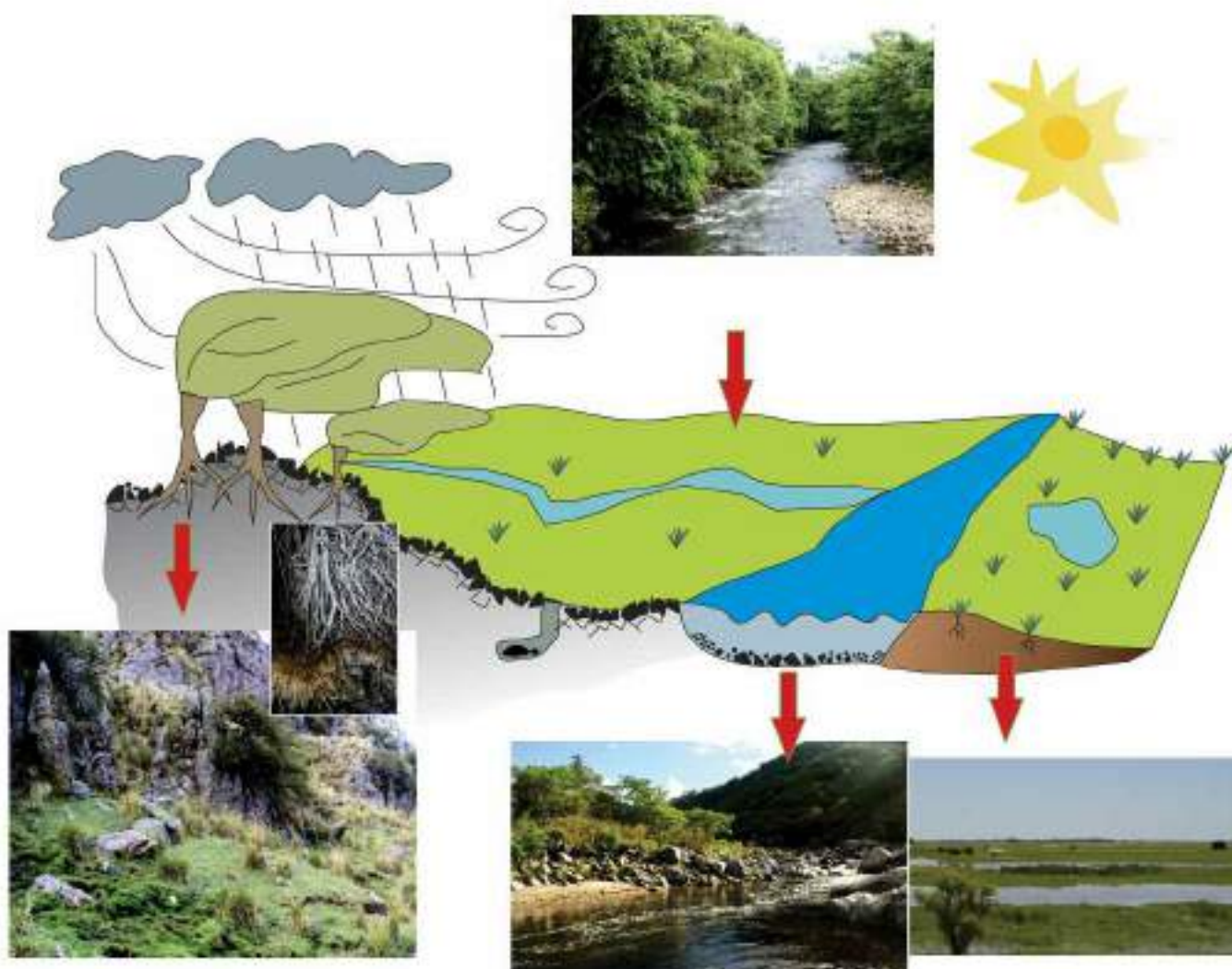


Figura 1

Esquema que reproduce los efectos de la intemperie sobre las rocas que están expuestas en superficie. Fotos de los autores.



Figura 2

Gravas, arenas y fangos. Barra verde indica 1 centímetro. Fotos de los autores.

Las huellas del agua

El agua, al caer en forma de lluvia, o cuando escurre por la superficie formando arroyos y ríos, o al formarse bloques de hielo en los glaciares, o con el movimiento de las olas, deja una serie de marcas y formas en el sedimento que los geólogos llamamos estructuras sedimentarias que luego podemos identificar y usar para interpretar su origen. Por ejemplo, en la Figura 3, se puede observar como luego de una fuerte lluvia se forma un torrente de agua que acarrea sedimento fangoso. Una vez finalizado el evento, el fango se seca y agrieta (Figura

El agua (ya sea en forma de lluvia, corrientes en un río o las olas del mar) y el viento dejan marcas en el sedimento que luego quedan grabadas en las rocas sedimentarias

3a). La historia termina cuando se produce una segunda lluvia más suave e intermitente que deja marcas de gotas de lluvia sobre el fango todavía húmedo. Estas se distinguen porque forman pequeños cráteres circulares con reborde por el impacto



a) Marcas de una corriente de agua transitoria que llevaba fango. Cuando deja de correr agua y el fango se seca se forman grietas por desecación. b) impresiones de gotas de lluvia que se distinguen por las formas circulares y rebordes. En el registro geológico, c) Grietas de desecación sobre rocas fangolíticas. d) roca pulida con surcos “estrías” por el movimiento de glaciares ocurridos hace aprox. 17.000 años, Neuquén. Fotos de los autores.

Figura 3

Figura 4

Arriba. Oleaje suave del mar. Las ondas del agua (a) quedan marcadas – duplicadas en el sedimento arenoso del fondo del mar (b).
Abajo. Ondas de arenisca que muestran el efecto del oleaje en antiguos mares (c) y lagos (d).
Fotos de los autores.



al chocar contra el suelo (Figura 3b). Las grietas de desecación muchas veces se preservan de tal manera que, al convertirse en roca, todavía se pueden observar (Figura 3c). En el caso de los glaciares, las masas de hielo pesadas se deslizan por la superficie, y al hacerlo, pulen las rocas expuestas de manera que dejan superficies lustrosas (Figura 3d). En este ejemplo, además del brillo de la roca se observan surcos producidos por fragmentos de rocas ubicados en la base del glaciar que al ser arrastrados rayan el sustrato.

El movimiento del oleaje

Al caminar por una playa en el mar o en un lago, si miramos detenidamente es fácil reconocer que la superficie de la arena tiene ondulaciones (Figura 4). Las ondulaciones son marcas (conocidas como ondulitas y ondas) dejadas por las olas que mueven la arena en vaivén. Cuanto más fuerte es el oleaje más grande son las ondulaciones y a la inversa.

Corrientes de agua

La corriente de agua de los ríos no siempre es igual de fuerte en todo su curso, sino que va variando entre el centro

Las ondulaciones son marcas (conocidas como ondulitas y ondas) dejadas por las olas que mueven la arena en vaivén

del curso y los márgenes. De este modo hay lugares donde el agua excava (zona de erosión) y forma canales y otras zonas donde el agua no tiene fuerza suficiente para llevar el sedimento (zona de depositación). Donde la corriente es más débil se forman bancos de arena y grava como el de la Figura 5a. Sobre los bancos de arena se forman rizaduras en forma de óndulas o rombos que se usan para saber hacia dónde se movía la corriente (flechas rojas).

Las huellas del viento

De igual manera que el agua acarrea sedimentos, el viento puede transportar arena y partículas más pequeñas como el polvo. En general, el viento no puede llevar muy lejos los sedimentos, especialmente el material arenoso, mientras que el material fino lo puede transportar a grandes distancias incluso de un continente a otro, como es el caso de los vientos alisios

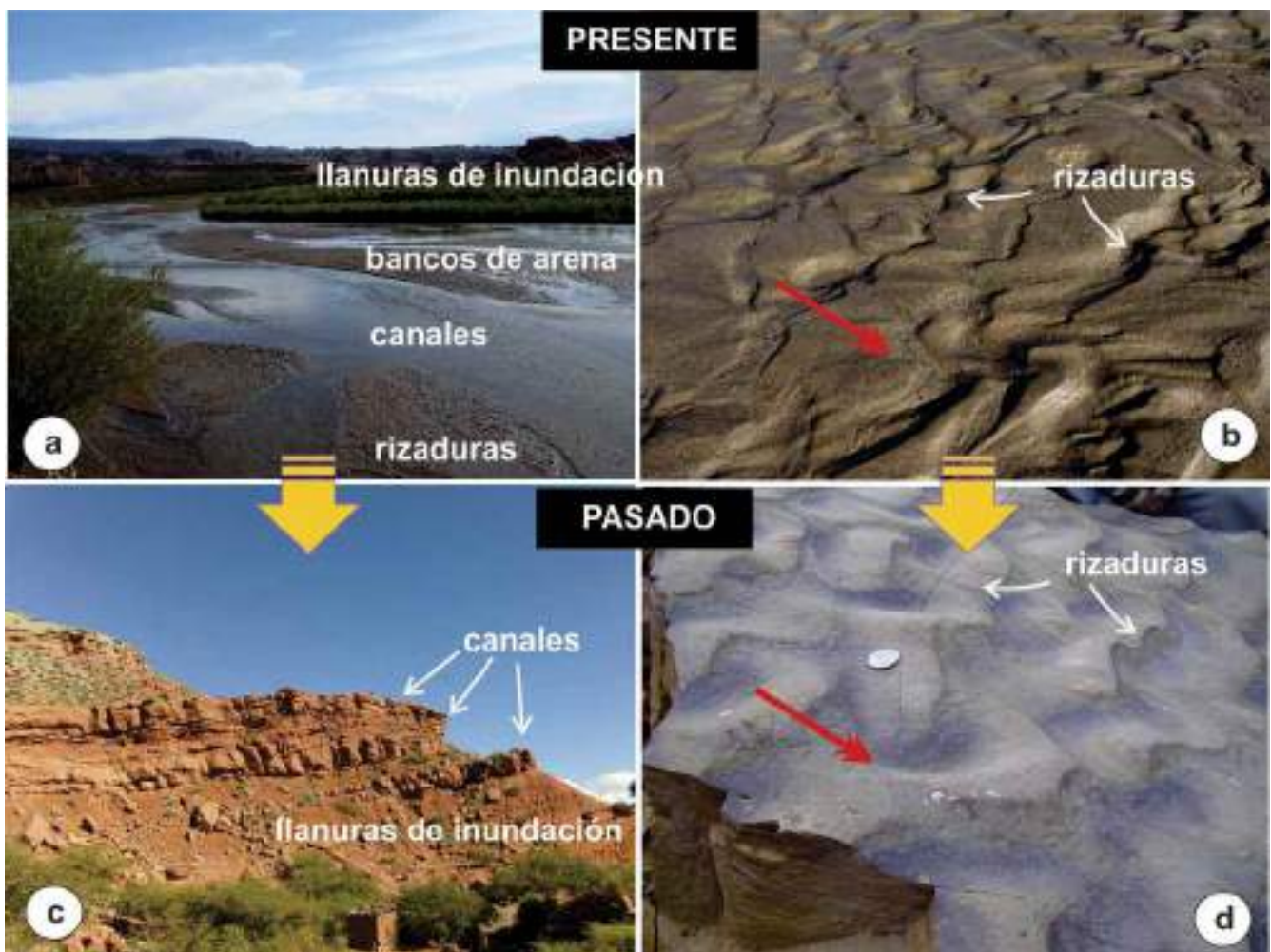
Reconocer que una arena ha sido depositada por el viento o el agua se utiliza para reconstruir (volver a armar) el paisaje del pasado y así saber si ese paisaje correspondía a un desierto, un río o mar, además de inferir cómo era el clima del pasado o paleoclima

que toman el sedimento del Sahara y lo dejan en el Amazonas. Este polvo viaja “en suspensión”, es decir flotando en el aire, pero los granos de arena más gruesos no pueden viajar flotando, entonces el viento los arrastra por la superficie y las partículas van saltando y reptando. Cuando el viento se detiene o pierde velocidad, los granos de arena dejan de moverse

y se acumulan formando montículos llamados “dunas”. Estas pueden tener unos pocos centímetros de altura o bien alcanzar algunas decenas de metros de altura como se muestra en la Figura 6a. Los granos de arena cuando son arrastrados por el viento se van moviendo por la cara de la duna que está de frente al viento (barlovento) y luego resbalan y caen por la cara de la duna que está al reparo del viento (sotavento o cara de avalancha). Estos procesos dejan huellas que luego se reconocen en las rocas sedimentarias.

De geólogos a detectives

Uno se podría preguntar para qué nos sirve la información dejada en las rocas por el agua y el viento. La respuesta es que nos sirve, y mucho. Reconocer que una arena ha sido depositada por el viento o por el agua se utiliza para reconstruir



a) Morfología de un río actual donde se distinguen los canales y los bancos de arena. b) Marcas de rizaduras u ondulitas sobre los bancos de arena actuales. c) Aspecto que tienen los sedimentos generados por los ríos del pasado, en este caso canales rellenos con arena (roca: arenisca) y llanuras de inundación formadas por sedimentos más finos que arena (roca: fangolita). d) Rizaduras formadas en antiguos bancos de arena. Fotos de los autores.

Figura 5

(volver a armar) el paisaje del pasado y así saber si este correspondía a un desierto, un río o mar, además de inferir cómo era el clima del pasado o paleoclima. Aquí inicia la tarea del geólogo-detective, que es la de indagar en las rocas y reconocer qué tipo de señales ha dejado, por ejemplo, el viento. El primer paso es descubrir las estructuras sedimentarias, tarea que generalmente va acompañada de mediciones, toma de fotografías y muestras de roca. Las mediciones van a decir en qué dirección soplab el viento (dirección de paleovientos), si su orientación era más o menos constante, o si el viento soplab en distintas direcciones. Por ejemplo, en la Figura 6a se muestran dunas gigantes (más de 30 metros de altura), llamadas “dunas en estrella”, que se encuentran en el desierto de Namibia y que se forman cuando el viento sopla en diferentes direcciones. En cambio, la Figura 6d ejemplifica el caso de dunas fósiles (convertidas en roca) donde el viento soplab de manera constante o casi constante de izquierda a derecha de la fotografía

en la dirección que muestra la flecha negra. En el trabajo de detectives, también se puede estimar la velocidad aproximada del viento teniendo en cuenta las dimensiones del grano de arena transportado, ya que cuanto más grande sea su tamaño, más fuerte debe ser la ráfaga de viento para lograr moverlo.

De igual manera, se puede investigar si un río corría de sur a norte, si el sedimento que transportaba era grava o arena y si el curso era sinuoso o más o menos recto. Estos datos nos permiten volver a armar el paisaje.

Soñar con paisajes

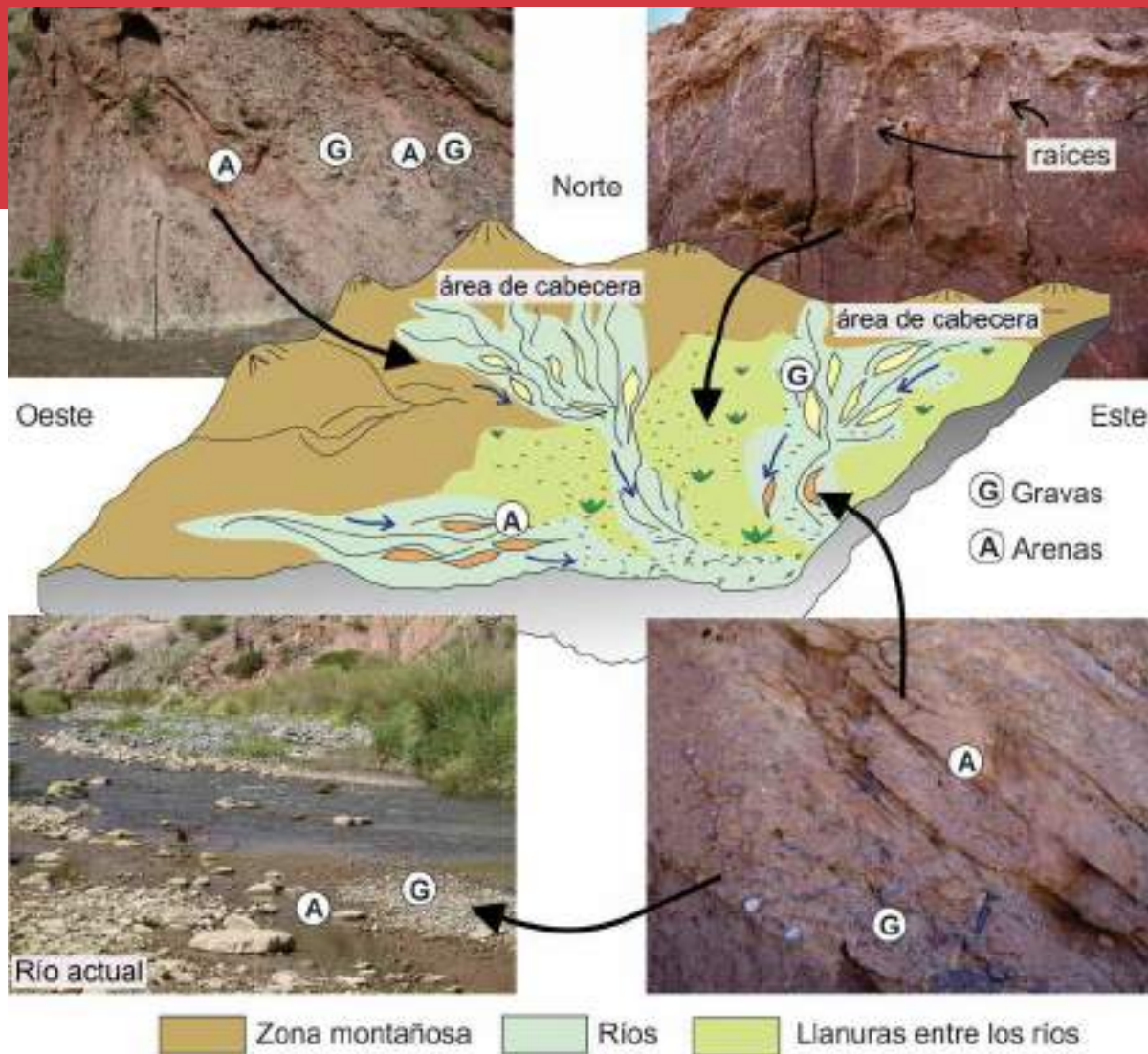
Cuando el geólogo reúne la mayor cantidad de datos, el paso siguiente es “imaginar” el paisaje relacionando toda la información.

Esta tarea no es fácil, y siempre será una reconstrucción tentativa o aproximada de cómo fue el paisaje en un lugar para un tiempo determinado. Por ejemplo, en la Figura 7 se ilustra



Figura 6

Dunas actuales y antiguas (fósiles). a) Dunas en estrella característica de vientos en varias direcciones, Desierto de Namibia. b) Duna actual donde se observa la cara de avalancha, región de Cafayate, Salta. c) Duna fósil y actual en la región de la Puna, Salta. d) Apilamiento de dunas (1, 2, 3) con caras de avalancha muy bien marcadas, La Rioja. Fotos de los autores.



Ríos bajo el mar

La cuenca hidrocarburífera argentina ubicada en el Golfo San Jorge ocupa parcialmente las provincias de Chubut y Santa Cruz, y una porción se desarrolla bajo el mar en la plataforma continental. Esta cuenca produce alrededor del 40% del petróleo de Argentina. Parte de este petróleo se extrae del subsuelo ubicado en la plataforma continental argentina. Aunque hoy se encuentre bajo el mar, las rocas de donde se extrae se formaron sobre el continente a partir de ríos que existieron hace aproximadamente 100 millones de años. Estos antiguos ríos tenían cursos errantes, muy sinuosos que escurrían rodeados de llanuras de inundación fangosas. El petróleo, por sus características, se aloja en las arenas, no en los fangos. Entonces, a la hora de realizar un pozo es crucial perforar justo donde había un canal y no donde estaba la llanura. Para ello, y previo a realizar la perforación, se necesita reconstruir el paisaje para conocer cómo era el río, en qué dirección corría y de qué ancho y profundidad eran los canales. A partir de distintas metodologías, se conoce que los ríos de hace 100 millones de años drenaban hacia el suroeste y que los canales rellenos de arena tenían una profundidad media de 3 metros. La reconstrucción del paisaje permite decidir en qué lugar se va a perforar un pozo en busca de los canales contenedores de petróleo.

una reconstrucción de ríos de montaña que fluyen desde el norte hacia el sur. Como los ríos de montaña tienen bastante pendiente, en la época de mayor caudal pueden arrastrar material grueso como la grava (letra “G” en la Figura 7), y cuando hay menos caudal el río tiene menos fuerza y lleva partículas sólo de tamaño arena o menor (letra “A” en la Figura 7). En este sentido, en ríos de montaña, los sedimentos de grava se concentran cerca de las zonas de cabecera (zonas proximales) debido a que por su tamaño se desplazan menos.

Mientras que la partícula de tamaños arena y fango al ser más pequeñas tienden a ser arrastradas hacia lugares más alejados de las cabeceras (zonas distales). La reconstrucción del paisaje antiguo es muy similar al río actual que se muestra en la Figura 7 donde se forman bancos de grava (G) y arena (A). Por ejemplo, el área ocupada entre los canales estaba formada por

arena y fango donde crecía vegetación. ¿Cómo sabemos?, porque se reconocen rasgos como cambios de coloración, nódulos de carbonatos y marcas de raíces que, en conjunto, indican el desarrollo de suelos.

Reconstruir el paisaje nos sirve para comprender la historia del planeta Tierra, aprender sobre el clima del pasado y proyectar sobre el impacto del clima a futuro. También tiene importancia para la explotación de los recursos naturales como agua, minerales, petróleo y gas. Determinados yacimientos se encuentran rela-

cionados a la disposición de las arenas ya sea en los canales de los ríos, playas o en dunas eólicas, por lo que conocer dónde había dunas o dónde y cómo se distribuían los canales de un río es fundamental para poder explotar de manera exitosa estos recursos.

Reconstruir el paisaje nos sirve para comprender la historia del planeta Tierra, aprender sobre el clima del pasado y proyectar sobre el impacto del clima a futuro. También tiene importancia para la explotación de los recursos naturales como agua, minerales, petróleo y gas

G Glosario

Barlovento (Duna): cara de la duna que se ubica en la misma dirección desde la que sopla el viento.

Sotavento (Duna): cara de la duna que se ubica en dirección contraria desde la que sopla el viento.

Nódulos de carbonatos: agregados de cristales de carbonato de calcio (calcita), de formas variadas desde esféricas, tubulares a irregulares. Comúnmente se los conoce como “muñecos de tosca”.

Estrías glaciares: surcos paralelos encontrados en superficies de rocas pulidas que son producto de del desgaste por la fricción entre fragmentos de rocas atrapadas en el interior del hielo y la superficie por la que se desliza el glaciar.

Estructuras sedimentarias: Formas geométricas y arreglos del sedimento que se originan de acuerdo a cómo se acomodan los fragmentos de rocas que lo componen.

RB Referencias Bibliográficas/ Lecturas sugeridas

Atlas de Estructuras Sedimentarias, Sitio web de la Asociación Argentina de Sedimentología: <https://www.sedimentologia.org.ar/spa/atlas-aas/>

Bridge, J.S., Jalfin, G., Georgieff, S., 2000. Geometry, lithofacies, and spatial distribution of Cretaceous fluvial sandstone bodies, San Jorge Basin, Argentina: outcrop analog for the hydrocarbon bearing Chubut Group. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 319-337.

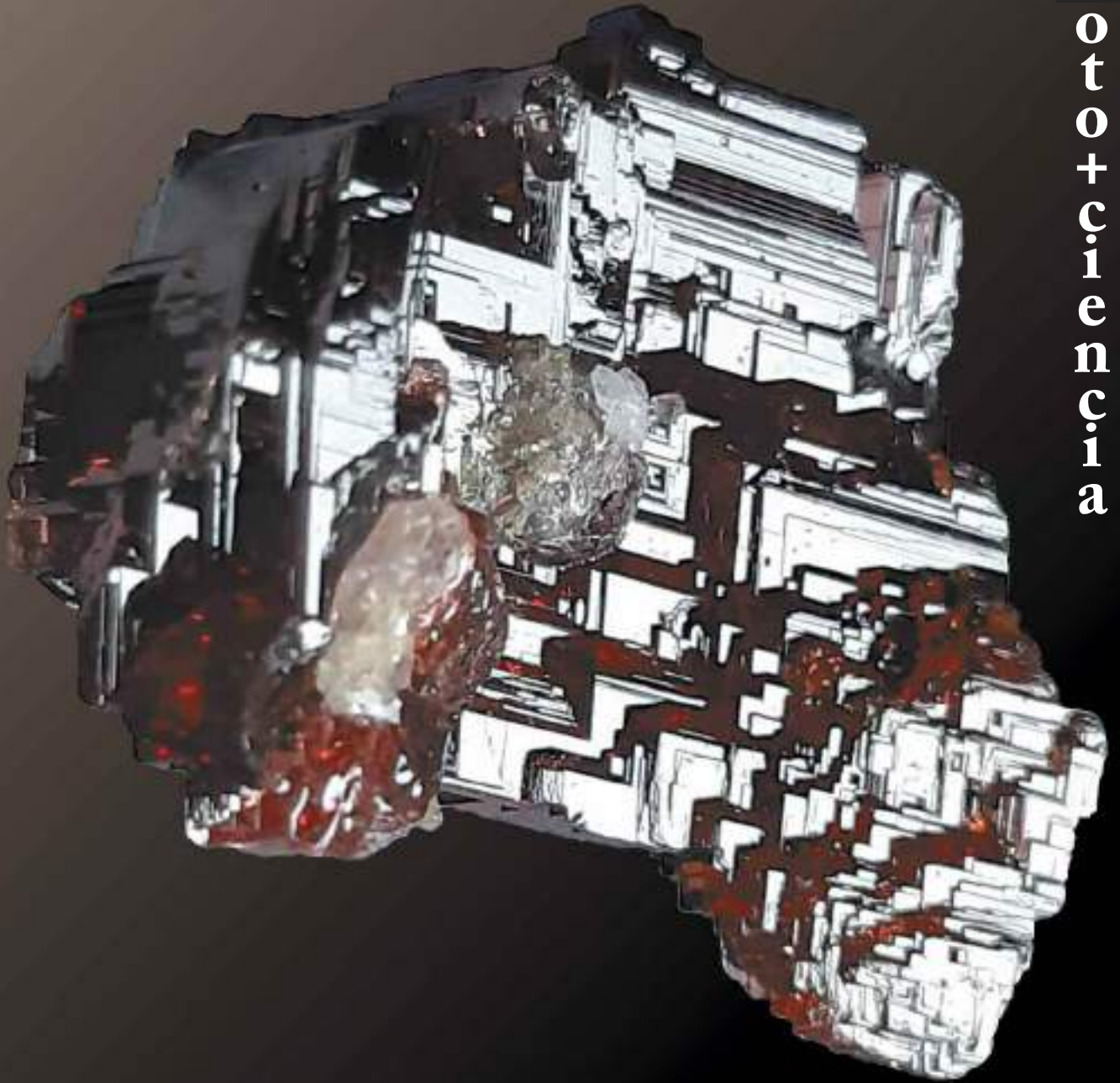
Carrera, M.G., 2019. El mar paleozoico de la región cuyana. Un paseo por el Caribe de la

Precordillera Argentina. *CICTERRANEA*, N°3: 38-45.

Paredes, J.M., Colombo, F., Allard, J.O., Foix, N., 2011. Alluvial architecture of fluvial successions in pyroclastic rich environments: the Castillo Formation (Albian) in the Golfo San Jorge basin, Argentina. 28th IAS Meeting of Sedimentology, Abstract p. 97, Zaragoza (Spain).

Reineck, H.-E. y I.B. Singh, 1980. *Depositional Sedimentary Environments With Reference to Terrigenous Clastics Second, Revised and Updated Edition Corrected Second Printing*. Springer-Verlag, 551 pp. Doi: 001: 10.1007/978-3-642-81498-3

Scasso, R.A. y Limarino, C. O., 1997. *Petrología y Diagénesis de Rocas Clásticas*. Asociación Argentina de Sedimentología, 258pp.



Cristal corroído de spessartina, un mineral miembro del grupo del granate de fórmula $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$.
Procedente de la mina Navigadora, cerca de Conselheiro Pena (Minas Gerais, Brasil). Dimensiones: 24 x 20 mm.
Autores: Elisa Pannunzio y Fernando Colombo.



INCENDIOS EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

La urgencia de un abordaje integral

El fuego en los ecosistemas de Córdoba

El fuego ha estado presente por miles de años en muchos de los ecosistemas de la Provincia de Córdoba, incluso desde antes de la llegada del ser humano, ya que las características climáticas y el tipo de vegetación los hacen propensos a quemarse. En consecuencia, la flora y la fauna de estos ecosistemas tiene en general una alta tolerancia y capacidad de recuperación

En el año 2020 los incendios en Córdoba alcanzaron magnitudes extremas, reavivando la discusión sobre sus causas, su impacto en los ecosistemas y las políticas públicas en torno a su manejo en el paisaje. Si bien los ecosistemas de Córdoba están adaptados a regímenes naturales históricos de fuego, la creciente presión humana los ha modificado drásticamente, generando a menudo un impacto ecológico y social negativo. Las causas y las consecuencias de los incendios sobre los ecosistemas son complejas y muy variables; por lo tanto, son necesarias decisiones planeadas y coherentes para lograr eficiencia en las políticas públicas. Éstas requieren un abordaje integral y sostenido del manejo del fuego de manera urgente.

La creciente presión de las actividades humanas desde tiempos históricos, pero más pronunciadamente en el último siglo, ha modificado drásticamente los regímenes naturales de incendios, poniendo en jaque la resiliencia de los ya diezmados ecosistemas naturales de Córdoba y causando un impacto ecológico y social negativo

ante los incendios (Figura 1). Sin embargo, la creciente presión de las actividades humanas desde tiempos históricos, pero más pronunciadamente en el último siglo, ha modificado drásticamente los regímenes naturales de incendios, poniendo en jaque la resiliencia de los ya diezmados ecosistemas naturales de Córdoba y causando un impacto ecológico y social negativo.

Si bien existen incendios de origen natural, por ejemplo iniciados por rayos, la gran mayoría son originados por el

ser humano, ya sea intencionalmente, por negligencia o accidentalmente. La falta de una gestión adecuada del fuego resulta en un alto costo socio-ambiental. Por un lado, la degradación de la flora, la fauna y los suelos debido, por ejemplo, a incendios muy intensos y/o frecuentes; y por otro lado el impacto para el ser humano debido a la pérdida de vidas, de bienes materiales como viviendas, cultivos y ganado doméstico, así como problemas de salud debido a la contaminación del aire y de los ríos, y de funcionamiento de la infraestructura (por ejemplo en aeropuertos y autopistas).

Es necesario restaurar y ajustar los regímenes de incendios para que se enmarquen en rangos ecológicamente aceptables, y que al mismo tiempo permitan una convivencia sostenible desde el punto de vista humano. Algunos de estos rangos son desconocidos y requieren de estudio antes de poder realizar una gestión más apropiada. Por lo tanto, resulta necesario un abordaje integral que considere las distintas facetas involucradas en el manejo del fuego.



Figura 1. La intensidad del fuego, asociada a distintos tipos de vegetación (eje vertical), así como el estado de la vegetación antes del fuego y el tiempo transcurrido desde el incendio (eje horizontal), son factores clave que determinan el efecto del fuego y la capacidad de recuperación de la vegetación. Las imágenes corresponden a distintos sectores de las Sierras de Córdoba. (Fotos de los autores).

La influencia humana

La expansión de zonas pobladas y de infraestructura, así como las actividades agrícolas y ganaderas, entre otras, han causado modificaciones en la vegetación, y también un aumento notable en las fuentes de ignición de los incendios. Esto ha llevado a cambios en aspectos claves de los regímenes de incendios, tales como su frecuencia, su intensidad, su extensión y su estacionalidad. Estos cambios condicionan la capacidad natural de respuesta de los ecosistemas, hasta el punto de producir cambios permanentes, por ejemplo, en la composición de especies y en el tipo de vegetación, afectando en consecuencia el funcionamiento de los mismos.

Sumado a los cambios que ocurren a escala local y regional, el cambio climático global, causado en gran medida por las actividades humanas a gran escala, es una presión adicional que favorece la propagación de incendios de magnitudes extremas. Por ejemplo, en el 2020, la combinación de una sequía prolongada y condiciones meteorológicas extremas de altas temperaturas, muy baja humedad ambiente y viento, hicieron que los incendios en distintos puntos de la Provincia de Córdoba, en su gran mayoría iniciados por el ser humano, se volvieran incontrolables. Así se quemaron casi 350.000 hectáreas, incluyendo muchas áreas que sufrieron incendios de alta severidad (Figura 2).

La visión antropocéntrica

En general el fuego es percibido como un factor ambiental muy negativo, principalmente debido a las imágenes negras desoladoras que quedan después de su paso. La belleza escénica de los paisajes es reemplazada por vastas superficies en las que solo se pueden ver "esqueletos" de árboles y arbustos, suelo desnudo y animales muertos o desesperados en búsqueda de alimento, agua y refugio. Sumado a esto, el fuego tiene un impacto directo en la vida del ser humano, en el peor de los casos causando la muerte de personas, pero también causando enormes pérdidas materiales, especialmente en las zonas de transición donde coexisten áreas residenciales, productivas y/o recreativas, y la vegetación silvestre, denominadas áreas de interfaz urbano-silvestre. En estas áreas suele encontrarse la infraestructura y bienes de mayor valor social, cultural y/o económico. Estos impactos negativos han llevado a que, en general, se prio-

ricen políticas de supresión del fuego, en detrimento de un abordaje integral de manejo, que considere aspectos ecológicos y sociales propios de cada región.

Las políticas de supresión apuntan a controlar cualquier foco de incendio, independientemente de su origen o de otros aspectos, tales como el tipo de vegetación afectada, la época del año, la ubicación geográfica y/o las condiciones meteorológicas en las que se está desarrollando el fuego. Esta política de manejo puede resultar poco efectiva, ya que hay ecosistemas que toleran el fuego e incluso hay algunas especies que se benefician con los incendios, por lo que su

En general las instituciones y los gobiernos tienen un enfoque reactivo en relación al fuego, en lugar de un enfoque preventivo. Frecuentemente las medidas apuntan a paliar la situación coyuntural y no las causas de fondo

ocurrencia ayuda a mantener ciertos tipos de vegetación natural en el paisaje. Por otro lado, hay zonas específicas que requieren atención prioritaria, como por ejemplo las zonas de interfaz urbano-silvestre y áreas de alto valor de conservación, ya sea por su biodiversidad o por su valor cultural.

Una mirada integral sobre el fuego

Teniendo en cuenta lo mencionado, en regiones propensas al fuego, muchos expertos coinciden en que la supresión total no es posible y tampoco deseable. En ecosistemas tolerantes al fuego, donde los incendios han estado presentes naturalmente, como en gran parte de la Provincia de Córdoba, un enfoque posible es el manejo integral del fuego para lograr regímenes sostenibles, que se ajusten a las características ecológicas y sociales de cada región y que garanticen una convivencia sostenible en el tiempo.

En general las instituciones y los gobiernos tienen un enfoque reactivo en relación al fuego, en lugar de un enfoque preventivo. Frecuentemente las medidas apuntan a paliar la situación coyuntural y no las causas de fondo. Las medidas preventivas son escasas y fragmentadas; por eso, es necesario coordinar acciones desde distintos sectores. Por un lado, para gestionar los incendios de origen natural teniendo en cuenta aspectos ecológicos (como el tipo



Figura 2. La severidad de un incendio puede ser evaluada a través de distintos indicadores, como por ejemplo el diámetro mínimo en pie de la vegetación en el área quemada, el estado de la corteza de las plantas afectadas por el fuego, y el estado del suelo en las zonas quemadas. (Fotos de los autores).

de vegetación afectada y el clima) y sociales (por ejemplo, la zona donde ocurre el incendio, las vidas humanas y los bienes materiales en riesgo). Por otro lado, para utilizar herramientas como el fuego prescrito, que consiste en la quema controlada de la vegetación en áreas determinadas, o los cortafuegos verdes, que son franjas de vegetación con baja carga de combustible y/o baja inflamabilidad, que previenen incendios de alta intensidad en zonas de riesgo.

La prevención y gestión apropiada de los incendios, ya sean naturales o de origen humano, es fundamental para que los parámetros tales como su frecuencia e intensidad, entre otros, se mantengan dentro de límites que permitan la recuperación de las áreas quemadas. En este contexto, la recuperación o restauración de los ecosistemas afectados puede ocurrir espontáneamente, es decir sin “ayuda” externa del ser humano. Pero también la intervención humana puede contribuir a su restauración, por ejemplo, a través de siembras y plantaciones de especies nativas, de la reintroducción de fauna extinta localmente, del control de especies exóticas, y/o de la fertilización del suelo con enmiendas naturales (compost). La restauración busca restituir el funcio-

namiento del ecosistema y garantizar la provisión de bienes y servicios ambientales importantes para la sociedad, como el mantenimiento de la fertilidad del suelo, la purificación

La recuperación o restauración de los ecosistemas afectados puede ocurrir espontáneamente, es decir sin “ayuda” externa del ser humano. Pero también la intervención humana puede contribuir a su restauración, por ejemplo, a través de siembras y plantaciones de especies nativas, de la reintroducción de fauna extinta localmente, del control de especies exóticas, y/o de la fertilización del suelo con enmiendas naturales (compost)

del aire y la provisión de agua para consumo humano, entre otros. Por lo tanto, es imprescindible que se plantee un abordaje amplio de la restauración ambiental de las áreas quemadas, es decir, que contemple la restauración ecológica teniendo en cuenta al mismo tiempo aspectos sociales y económicos enmarcados dentro de leyes vigentes.

Estas medidas deben ir acompañadas de un ordenamiento territorial que explicita los objetivos deseables para garantizar el bienestar de los ecosistemas y de la sociedad a través del manejo sostenible. Este marco permitirá gestionar apropiadamente las actividades humanas en distintas áreas de la provincia, como por ejemplo la expansión urbana y de infraestructura en zonas de interfaz, las actividades turísticas, y la ganadería y la agricultura, entre otras.

Todas estas actividades tienen efectos directos sobre los regímenes de fuego, y deben ser estrictamente reguladas para alcanzar los objetivos planteados. En este sentido, es necesario que el estado en sus distintos niveles tome un rol

activo en la implementación de leyes ambientales vigentes, tales como la Ley Nacional 26.331 (Presupuesto mínimo de protección ambiental), la Ley Nacional 25.675 (Política Ambiental), la Ley Nacional 26.815 (Sistema Federal de Manejo del Fuego), la Ley Provincial 9.814 (Ordenamiento Territorial Provincia de Córdoba), Ley Provincial 8.751 (Manejo del Fuego Provincia de Córdoba) y Ley 10.467 (Plan Provincial Agroforestal Provincia de Córdoba), incluyendo la asignación y ejecución apropiada de fondos previstos en estas leyes, así como el cumplimiento de estas normas por parte de la sociedad en general.

Pedro Jaureguiberry,

Dr. en Ciencias Biológicas
Investigador Asistente del CONICET en IMBIV (CONICET-UNC)

Juan P. Argañaraz,

Dr. en Ciencias Biológicas
Investigador Asistente del CONICET en CONAE
Docente del Instituto Gulich (CONAE-UNC)

Melisa A. Giorgis,

Dra. en Ciencias Biológicas
Investigadora Adjunta del CONICET en IMBIV (CONICET-UNC)
Docente de la FCFyN, Universidad Nacional de Córdoba
Miembro de la ONG Ecosistemas Argentinos



Referencias bibliográficas/lecturas sugeridas

Carbone, L.M., De Luca, N., Eynard, C., Gallarà, F.A., Herrero, L., Oggero, A.J., Peltzer, P.M., Piedrabuena, J., Torres, R.C. y Venier, P. 2020. Restauración Ambiental Posfuego En Las Sierras de Córdoba, Argentina. Córdoba, Argentina: Red de Restauración Ecológica de Argentina, Nodo Centro.

Carbone, L.M., Tavella, J., Naval, C., Bianchi, M.M., Urcelay, C., Marcora, P., Longo, S., Rodríguez, J.M., Jaureguiberry, P., Landi, M., Bravo, S., y Blackhall, M. El fuego en los ecosistemas Argentinos. *Folium* 3, 28-47.

Giorgis, M.A., Cingolani, A.M. y Cabido, M. 2013. El Efecto Del Fuego y Las Características Topográficas Sobre La Vegetación y Las Propiedades Del Suelo En La Zona de Transición Entre Bosques y Pastizales de Las Sierras de Córdoba, Argentina. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica* 48 (3-4): 493-513.

Marinelli, M.V., Bustos, S., Viotto, S., Clemente, J.P., Benitez, J., Mari, N.A., Scavuzzo, C.M. y Argañaraz, J.P. 2019. Elaboración de la base de datos de incendios 1987-2018 para las Sierras de Córdoba mediante imágenes Landsat. IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental Florencia Varela, Argentina. 2 al 5 de Diciembre de 2019.

Glosario

Régimen de fuego: es el patrón general en el que los incendios ocurren en un ecosistema particular durante un período prolongado de tiempo. Los regímenes de incendios están definidos por una combinación de factores que incluyen frecuencia, intensidad, extensión, período del año en el que ocurren y severidad, entre otros.

Resiliencia: es la capacidad de los ecosistemas de tolerar perturbaciones manteniendo sus características de estructura, dinámica y funcionalidad dentro de ciertos límites, lo cual les permiten retornar a la situación previa a la perturbación tras el cese de la misma.

Sostenibilidad: es la satisfacción de las necesidades actuales, sin poner en riesgo las necesidades futuras, garantizando el equilibrio entre el cuidado del ambiente, el desarrollo económico y el bienestar social.

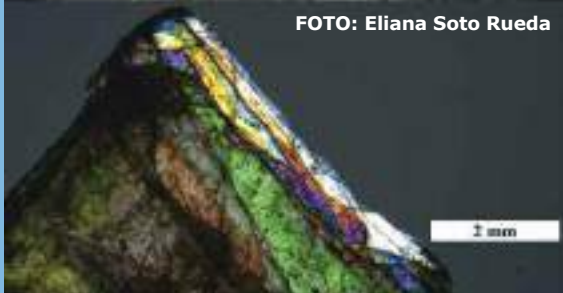
Severidad del fuego: es una medida del efecto del fuego sobre el ambiente, que integra los cambios físicos, químicos y biológicos en el ecosistema y que se relaciona con su capacidad de regeneración tras el paso del fuego. Está controlada principalmente por las condiciones meteorológicas, la topografía del terreno y el tipo de vegetación.

FICHA GEOLÓGICA

MINERALES: MOSCOVITA



FOTO: Eliana Soto Rueda



Composición y sistema de cristalización: La moscovita es un mineral que pertenece al grupo de las micas. Está formada por silicato básico de potasio y aluminio, a veces con algo de cromo o manganeso que reemplaza al aluminio. Se le clasifica dentro de la clase de los silicatos, subclase de filosilicatos. Las micas como la moscovita tienen un sistema cristalino monoclinico. Presenta un hábito laminar, en cristales tabulares de contorno hexagonal o en láminas flexibles y elásticas. Se le puso este nombre por una antigua provincia rusa, donde grandes cristales de este mineral se empleaban como sustituto del vidrio en ventanas, al que llamaban "cristal de Moscovia".

Color y dureza: Este mineral es transparente o incoloro, aunque en bloques gruesos puede ser traslúcido combinado con tonalidades amarillas, plateadas, pardas, verde o rosa. Su brillo se define como vítreo a sedoso, y también perlado. La moscovita se caracteriza por tener una dureza baja de 2 a 2,5 en la escala de Mohs y un peso específico entre 2,8 a 2,9 g/cm³. No es resistente a la meteorización química, por lo que fácilmente se transforma en minerales arcillosos.

Origen y presencia en rocas: Las micas, como la moscovita, se encuentran entre los minerales más abundantes en la Tierra. Su presencia se nota especialmente en las pegmatitas, rocas metamórficas de contacto, esquistos metamórficos y venas hidrotermales. Los depósitos importantes de moscovita con grandes cristales ocurren casi exclusivamente en pegmatitas de granito.

Yacimientos en Córdoba: Las micas se encuentran entre los minerales que comúnmente se extraen en Córdoba. En general, los yacimientos que son explotados están en el sector oriental de las Sierras de Córdoba, habitualmente al este del cordón de la Sierra Chica y Sierra Norte.

Usos comerciales: Se emplea como material aislante en aparatos eléctricos, por sus excelentes propiedades dieléctricas y de resistencia al calor. La moscovita laminar se utiliza en puertas de hornos y estufas, como aislante térmico incombustible. También se utiliza en la fabricación de pinturas, compuestos para juntas, caucho plástico.

¿Dónde encontrarla?: El mineral de moscovita es muy común en minas de todo el mundo. Existen grandes yacimientos en India, Brasil, Pakistán, Estados Unidos y España. Se exhibe en el Museo Provincial de Ciencias Naturales "Dr. Arturo Umberto Illia", en el Museo de Mineralogía y Geología "Dr. A. Stelzner" de la FCEFN, UNC, pero también las podés ver naturalmente en las sierras cordobesas!

FICHA PALEONTOLÓGICA

ARTRÓPODO: TRILOBITE

Incaia deormaecheai Baldis & Cabaleri, 1988



Características generales: Los trilobites (Trilobita, del latín, «tres lóbulos») son una clase de artrópodos extintos, considerados los fósiles más característicos de la Era Paleozoica (entre 522-252 millones de años). Estaban protegidos por un exoesqueleto o caparazón dorsal calcificado y dividido en tres regiones: céfalo, tórax y pigidio. El exoesqueleto mineralizado fue una muy buena protección frente a los depredadores y, además, les otorgó un excelente potencial de preservación, por lo que son extremadamente abundantes en el registro fósil. Aparecieron en el período Cámbrico y su presencia en la Tierra se prolongó por más de 270 millones de años, hasta finales del período Pérmico. Durante este extenso intervalo evolucionaron en formas muy diferentes por lo que se han descrito hasta el momento más de 22.000 especies. También fueron ecológicamente muy exitosos, se adaptaron a una amplia variedad de ambientes, fundamentalmente marinos, pero también de aguas salobres como estuarios o deltas.

Características particulares: *Incaia deormaecheai* es la especie mejor conocida del género. Al igual que otras especies de la familia Trinucleidae presenta una peculiar franja perforada rodeando el céfalo. Si bien algunos investigadores propusieron que ésta habría servido para filtrar partículas alimenticias, su función es enigmática.

Periodo: *Incaia deormaecheai* se registra a comienzos del Ordovícico Superior, hace aproximadamente 458 millones de años.

Distribución geográfica: Los trilobites se distribuyen ampliamente en el Noroeste argentino, en los alrededores de las ciudades de Salta y Jujuy, y a lo largo de la Quebrada de Humahuaca. También se pueden encontrar en la Puna, Sierra de Famatina, Sierras Subandinas y Precordillera argentina. *Incaia deormaecheai*, proviene de esta última región, de depósitos de rocas ubicados en la provincia de San Juan.

Observaciones: La mayoría de los trilobites poseían ojos formados por lentes de carbonato de calcio que, orientadas en distintas direcciones, les permitía tener un amplio ángulo de visión. Los ojos de los trilobites se consideran uno de los sistemas visuales más antiguos del registro geológico. Estas primeras "ventanas al mundo externo" son muy similares a los ojos que se encuentran en los artrópodos modernos.

Lugares de repositorio: En la ciudad de Córdoba, se exhiben ejemplares de trilobites en el Museo Provincial de Ciencias Naturales Dr. Arturo Umberto Illia y el Museo de Paleontología de la FCEFN-UNC. Algunos ejemplares de la especie *Incaia deormaecheai* se pueden encontrar en la Colección Paleontológica del CICTERRA.

Jóvenes en Ciencia

Ariadna Coppa Vigliocco

Ariadna es geóloga egresada de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Actualmente, se desempeña como estudiante de Doctorado en Ciencias Geológicas de la UNC con una beca doctoral de CONICET en el CICTERRA (CONICET, UNC).



Su proyecto doctoral consiste en hacer un estudio del origen y la evolución de las rocas de la Formación Yacoraite en el Noroeste Argentino. Estos estudios se realizan bajo la dirección del Dr. Ricardo Astini y el Dr. Fernando Gómez y resultan clave para comprender los fenómenos asociados con los sitios de acumulación de sedimentos, ayudando a conocer la distribución y el potencial que poseen estas cuencas como eventuales fuentes de recursos hidrocarbúferos en Sudamérica.

¿UN MAR SOMERO O UNA GIGANTESCA LAGUNA?

Litofacial, petrogenético y geoquímico... palabras que no escuchamos muy seguido en lo cotidiano ¿nos contarías un poco de que se trata tu área de investigación?

Si bien cada una de esas palabras está enfocada a responder preguntas específicas, como rasgos texturales, estructuras, composición química y colores, lo cierto es que en conjunto nos dan una idea de los procesos físicos, químicos y biológicos que les ocurre a los sedimentos en las áreas donde se acumulan. Estos sedimentos se transformarán en rocas sedimentarias, es decir, rocas que se forman por acumulación de partículas de diversos tamaños transportadas por el agua, el hielo o el viento y que luego son sometidos a procesos físicos y químicos (diagénesis) dando lugar a materiales consolidados. Extensas regiones deprimidas de la tierra acumulan sedimentos durante millones de años (cuencas sedimentarias) y su análisis implica estudiar las rocas que allí se forman interpretando los paleoambientes y su evolución en el tiempo. El ambiente en el que se formó la Formación Yacoraite ha

sido discutido por largo tiempo y la motivación de estudiarla radica en profundizar lo que sabemos de ella, en comprender, por ejemplo, si originalmente los sedimentos se acumularon en un mar poco profundo o una gigantesca laguna y en hacernos nuevas preguntas que nos lleven a ampliar nuestro conocimiento.

El Noroeste de Argentina es uno de los lugares más atractivos del país ¿Disfrutás de trabajar en sitios turísticos o esto trae alguna complicación para tus tareas de campo?

Recorrer lugares que son turísticos por naturaleza y a la vez hacer geología ¡es genial! Con mi grupo de trabajo tratamos de ir en fechas que no son muy visitadas, generalmente septiembre-octubre, por ende no tenemos ninguna complicación. El noroeste de nuestro país es una región donde habitan comunidades que representan a los pueblos originarios, y tenemos mucho respeto por sus habitantes y sentido de conservación de su entorno, por lo que intentamos siempre hacer un intercambio de conocimientos y devolverles algo de lo aprendido.





La Formación Yacoraite es bien conocida por sus yacimientos de petróleo que se explotan hace muchos años. ¿En qué contribuye tu investigación al conocimiento de este reservorio/fuente de hidrocarburos?

Sí, esta formación es sumamente interesante desde varios puntos de análisis. Uno de ellos es su potencial hidrocarburífero que se expresa mejor hacia el este, en el subsuelo, donde se generaron y almacenaron hidrocarburos para que luego pueden ser extraídos de la profundidad de la tierra. Por lo tanto, el análisis de los aspectos sedimentarios de las rocas que se encuentran en la superficie y en subsuelo nos permite caracterizar estos sistemas petroleros y comprender mejor los ambientes depositacionales en los que se formaron para luego hacer comparaciones con otros siste-

mas que son muy parecidos, como por ejemplo algunos yacimientos de Brasil

¿Qué es lo que más te gusta de tu trabajo?

Una de las actividades que más disfruto es observar las rocas al microscopio, ya que es como entrar en un universo distinto, ¡puedo estar horas sin cansarme! Por supuesto, también me gusta ir de viaje de campo, es una instancia de aprendizaje puro.

Hacer una tesis doctoral debe ser una actividad que te insume muchas horas del día, pero ¿tenés otras actividades? ¿Qué te gusta hacer en los ratos libres?

Me gusta hacer actividad física, salir a correr y ejercitarme. Disfruto mucho de salir a comer y tomar algo con mis compañeros del trabajo. En verano amo ir al río y tomar sol y en invierno, cocinar cosas dulces como postres y tortas.

Es muy interesante todo lo que nos contaste del trabajo y la importancia de tu investigación; ¿Pensaste cómo seguir en el futuro?

A lo largo de mi doctorado he sumado otros intereses para seguir investigando. Actualmente, me estoy enfocando en estudiar unas partículas carbonáticas esféricas conocidas como ooides que son muy interesantes ya que hay aspectos en cuanto a sus procesos de formación que no están muy claros aún y me encantaría especializarme en ello, explorando otras regiones y conectándome con otros especialistas del tema. Por ende, me gustaría seguir en la investigación científica pero no descarto volcarme a la actividad privada si siento que me hace feliz y me desafía de la misma manera que hoy me provoca investigar.

Recorridos que dejan huellas

Homenaje a paleontóloga cordobesa

Un equipo de paleontólogos de nuestro país publicó recientemente el hallazgo de una nueva especie de rincosaurio – grupo muy particular de reptiles – en sedimentos de la provincia de la Rioja que tienen 237 millones de años de antigüedad, correspondiendo al Triásico Medio.

Esta especie fue nombrada *Elorhynchus carrolli*, en honor a la paleontóloga Biól. Eloisa Argañaz, quien participara desde un inicio de las campañas paleontológicas al Triásico de la Rioja y del descubrimiento de dicho material fósil en el año 2011. Los autores de esta especie, homenajearon también con la misma al Dr. Robert Carroll, paleontólogo fallecido en el año 2020 a causa de Covid-19 y reconocido por sus trabajos sobre la anatomía y evolución de los reptiles diápsidos más antiguos, entre ellos de los primeros rincosaurios..

El nuevo rincosaurio

Los rincosaurios fueron un grupo exitoso de arcosauriomorfos que florecieron en el Triásico Superior y que carecen de formas actuales relacionadas. Es un grupo lejanamente emparentado con cocodrilos y dinosaurios/aves. Sus miembros eran cuadrúpedos desparramados, herbívoros voluminosos que llegaron a medir casi 3 metros de largo, con un cráneo muy particular conteniendo picos ganchudos

Elorhynchus carrolli tiene características en su cadera y primeras vértebras de la cola que permiten diferenciarlo de otros rincosaurios, por lo que representa un nuevo género y especie. Es el primer taxón nominado para la Formación Chañares en los últimos 22 años y nos revela las primeras pistas del éxito evolutivo de estos arcosauriomorfos en el noroeste de la Argentina. Este nuevo rincosaurio, *Elorhynchus carrolli*, que



conformaba una de las asociaciones de rincosaurios más antigua conocida para América del Sur, tiene sus parientes más cercanos en rocas del Triásico Medio de Brasil, India, Tanzania y los Estados Unidos.

Eloisa

Eloisa Argañaz, alias “la Elo”, se recibió de bióloga en la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) realizando su tesina de grado bajo la dirección de la Dra. Teresa Sánchez en huevos fósiles del Cretácico del Chubut, los primeros huevos de dinosaurios titanosaurios reportados para esa provincia patagónica. Ella se sumó al grupo de investigaciones en Paleobiología de Arcosauriformes (Archosauriform Research Group - ARG) con lugar de trabajo en el CRILAR-Anillaco (CONICET, La Rioja) donde participó en numerosas campañas paleontológicas a varias localidades del Cretácico riojano, así como también al Triásico de Talampaya. Con infinita dedicación y entusiasmo se sumergió en el mundialmente conocido Triásico de La Rioja mostrando no sólo su disponibilidad al trabajo, sino una gran calidad humana. En junio del año 2014, y dirigida por el Dr. Fiorelli y la Dra. Desojo, fue aceptada por el Doctorado en Ciencias Geológicas de la UNC para estudiar las letrinas comunales fósiles y sus coprolitos de la Formación Chañares, tesis que no pudo continuar debido a que en agosto de 2014 falleció de forma repentina por un terrible problema de salud.

Madre, compañera, amiga, una gran profesional que dejó una marca en la ciencia y en los corazones de sus compañeros de equipo y amigos. De esta modesta forma el grupo de trabajo al que perteneció “la Elo”, conformado por Martín Ezcurra, Lucas Fiorelli, Jimena Trotteyn, Agustín Martinelli, Belén von Baczko, Jeremías Taborda y Julia B. Desojo deja la impronta de un simple pero sentido homenaje para una persona valiosa que llenó de hermosos recuerdos a los que tuvieron el placer de conocerla.

Artículo completo:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14772019.2020.1856205>

Archosauriform Research Group (ARG):

<http://archosaurarg.wix.com/archosaur>



Colonia del briozoo *Pinegopora chilensis* del Pérmico de la región Norte de Chile. Los briozoos son organismos que viven actualmente en mares de todo el mundo y se los encuentra como fósiles desde principios del Paleozoico, hace 470 millones de años. Escala: 1 mm. **Autor: Marcelo G. Carrera.**



**DE GLACIARES
A DESIERTOS
EL OCASO DE UNA ERA**

Hacia finales de la Era Paleozoica, durante los períodos Carbonífero y Pérmico, tuvo lugar una sorprendente sucesión de acontecimientos, inicialmente protagonizada por grandes masas glaciales cubriendo una parte importante de la Tierra y culminando con una etapa de aridez severa y generalizada, que puso en riesgo la vida en el planeta. En distintos sectores de nuestro país podemos encontrar el registro de estas complejas variaciones del clima del pasado. Las rocas que se formaron en estos tiempos, en una geografía muy diferente a la actual, y la vida marina y terrestre, tanto faunas como floras, fueron testigos de estas condiciones climáticas tan extremas.



Andrea F. Sterren
Dra. en Ciencias Geológicas
Investigadora Adjunta CONICET
en CICTERRA (CONICET-UNC)

Hacia finales del Paleozoico, la distribución de las tierras emergidas era muy diferente a la que vemos hoy. Cada una de las masas continentales se movilizaron hasta reunirse en un único gran continente, cerrando mares antiguos y originando el más grande de los océanos que registró nuestro planeta, el Pantalasa (Figura 1; ver CICTERRÁNEA 1, “¿Se mueven los continentes?”).

Durante esta etapa, la historia geológica de nuestro gran hogar, la Tierra, revela también importantes variaciones climáticas caracterizadas por una etapa de muy bajas temperaturas en el período Carbonífero, que transcurrió hace 358 a 298 millones de años (Ma) mientras hacia mediados del período Pérmico (298 a 251 Ma) los glaciares se funden, dando inicio a una extensa época de calentamiento global.

Pérmico tardío



Carbonífero temprano



A finales del Paleozoico, tuvo lugar una etapa de frío generalizado, que se conoce como la Edad de Hielo del Paleozoico Tardío (LPIA son sus siglas del inglés *Late Paleozoic Ice Age*), que es uno de los eventos climáticos más espectaculares e interesantes de la historia de la Tierra

La primera etapa, de frío generalizado, se conoce como la Edad de Hielo del Paleozoico Tardío (LPIA son sus siglas del inglés *Late Paleozoic Ice Age*), y es uno de los eventos climáticos más espectaculares e interesantes de la historia de la Tierra.

Figura 1. Disposición de los continentes para el Carbonífero (358 a 298 millones de años) y Pérmico (298 a 251 millones de años). En el Carbonífero los mantos de hielo cubrieron gran parte del megacontinente de Gondwana, el cual se ubicaba sobre el polo sur, mientras algunos mares de aguas más templadas se desarrollaron en bajas latitudes. En el Pérmico todas las masas continentales se amalgamaron formando la Pangea, un supercontinente que se extendió de polo a polo, dejando al oeste un enorme océano llamado Pantalasa y al este uno más pequeño llamado Paleotetis. Mapa realizado con GPlates 1.5 utilizando PALEOMAP PaleAtlas de Scotese 2016.

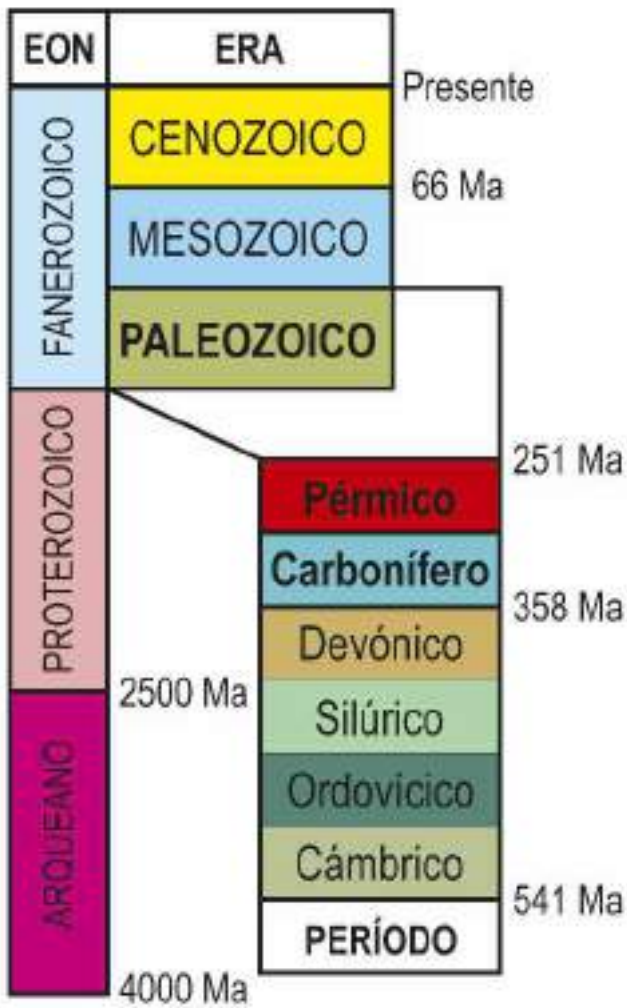


Figura 2. Escala de tiempo geológico global que muestra los períodos de la Era Paleozoica que se describen en esta nota. Ma: millones de años.

Separando el mundo en dos

La etapa glacial fue una de las más extensas conocidas en la historia de nuestro planeta, tanto por su duración (100 Ma, Figura 2) como por el área afectada, ya que dejó su huella en gran parte de la superficie terrestre. En esos tiempos los actuales territorios de América del Sur, África, Antártida, Australia e India se ubicaban en torno al polo sur, formando un único megacontinente llamado Gondwana (Figura 3). En varias regiones de este gran continente hoy encontramos evidencias del desarrollo de masas de hielo de grandes dimensiones, similares a las que hoy

En estos tiempos alternaron intervalos glaciales (*icehouse*) con períodos no glaciales o interglaciales (*greenhouse*), cuya duración no habría superado los 10 millones de años. Estas variaciones extremas del clima son similares a las que se registran en épocas más cercanas para la humanidad, como es el caso de los últimos 2,5 millones de años del Cenozoico. Por eso, analizar lo que sucedió en estas Eras Geológicas ayuda a entender las variaciones más recientes asociadas al cambio climático global

cubren la Antártida (Figura 4). Incluso, es posible reconstruir cómo fueron los ambientes y qué pasó con los seres vivos en el mar y en el continente en una etapa posterior, luego de que estos imponentes glaciares se fundieran.

En estos tiempos alternaron intervalos glaciales (*icehouse*) con períodos no glaciales o interglaciales (*greenhouse*), cuya duración no habría superado los 10 millones de años. Estas variaciones extremas del clima son similares a las que se re-



Figura 3. Ubicación de los registros de eventos glaciales en Gondwana, de edad carbonífera en el oeste y pérmica en gran parte del megacontinente (Modificado de López Gamundí, 2010).



Figura 4. Vista aérea de glaciares que cubren actualmente la Antártida. Paisajes similares habrían existido en algunas regiones de Gondwana, por ejemplo en el oeste de América del Sur, durante la Edad de Hielo del Paleozoico Tardío. (Foto M. Martini).

gistran en épocas más cercanas para la humanidad, como es el caso de los últimos 2,5 millones de años del Cenozoico. Por eso, analizar lo que sucedió en estas Eras Geológicas ayuda a entender las variaciones más recientes asociadas al cambio climático global.

¡Pero no todo el mundo estaba congelado durante la Edad de Hielo del Paleozoico Tardío! Mientras la parte austral del planeta permanecía helada, una historia muy diferente ocurría en el hemisferio norte, donde el resto de las placas continentales se distribuían en latitudes cercanas a la línea del Ecuador

bajo un clima paleotropical húmedo. Allí se desarrollaron extensas turberas que dieron origen a importantes yacimientos de carbón en algunas regiones de Europa y también en Norteamérica. La presencia de grandes cantidades de carbono en estas turberas habría provocado la reducción de los valores de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, favoreciendo un descenso global de la temperatura. Al igual que en la actualidad, la concentración variable de dióxido de carbono atmosférico jugó un rol importante en la dinámica del clima en estos períodos.

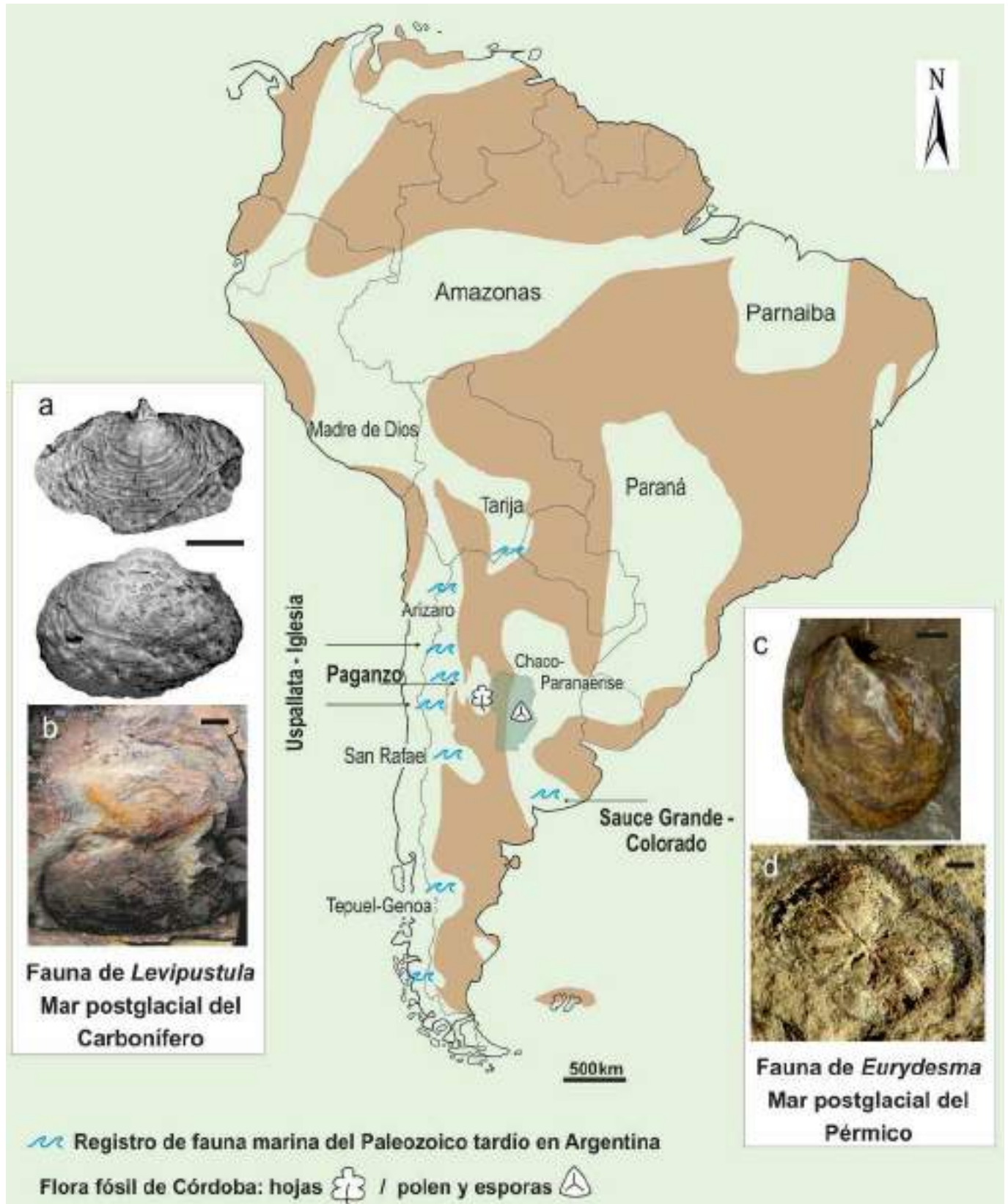


Figura 5. Cuencas sudamericanas del Paleozoico tardío. El color marrón indica áreas de relieve positivo que se diferencian de las más bajas o deprimidas sobre las cuales avanzó el mar. Las faunas marinas frías del Carbonífero del oeste argentino (cuenca Uspallata-Iglesia) están caracterizadas por el braquiópodo *Levipustula* (a) y el bivalvo *Streblochondria* (b). Los invertebrados marinos del postglacial pérmico en la cuenca Sauce Grande-Colorado se caracterizan por el bivalvo *Eurydesma* (c) y el braquiópodo *Tivertonia* (d). Los fósiles están resguardados en los repositorios del CICTERRA, Fundación Miguel Lillo y Museo de La Plata. Las líneas negras equivalen a 5 mm. Además se indica la ubicación de los fósiles del Paleozoico tardío en sedimentos de la Provincia de Córdoba (restos de plantas, polen y esporas).

Las “cuencas” abiertas de América Latina

La Edad del Hielo del Paleozoico Tardío quedó registrada en nuestro actual continente sudamericano que, por aquel entonces, se ubicaba en el extremo occidental de Gondwana. Este megacontinente se desplazaba sobre la superficie terrestre, y a medida que se alejaba del polo sur los mantos de hielo se derretían. Por este motivo, los glaciares comenzaron a fundirse primero en las regiones del oeste durante el Carbonífero, y recién en el Pérmico en las cuencas del este (Figura 3).

Las masas glaciales que cubrieron gran parte de América

del Sur dejaron a su paso importantes marcas de erosión sobre el terreno, transportaron grandes bloques de roca y al fundirse depositaron espesas capas de sedimentos, conocidas como diamictitas. A partir del estudio de estos sedimentos y eventualmente del hallazgo de fósiles, podemos conocer cuáles fueron los ambientes y cómo habrían sido los paisajes que existieron en las diferentes regiones.

El agua generada por el deshielo inundó las tierras más bajas, originando lagos o provocando el avance del mar sobre las regiones costeras, marcando diferentes historias geológicas en el margen occidental, bañado hoy por el océano Pacífico, y en las regiones ubicadas en las actuales costas del océano Atlántico (Figura 5).

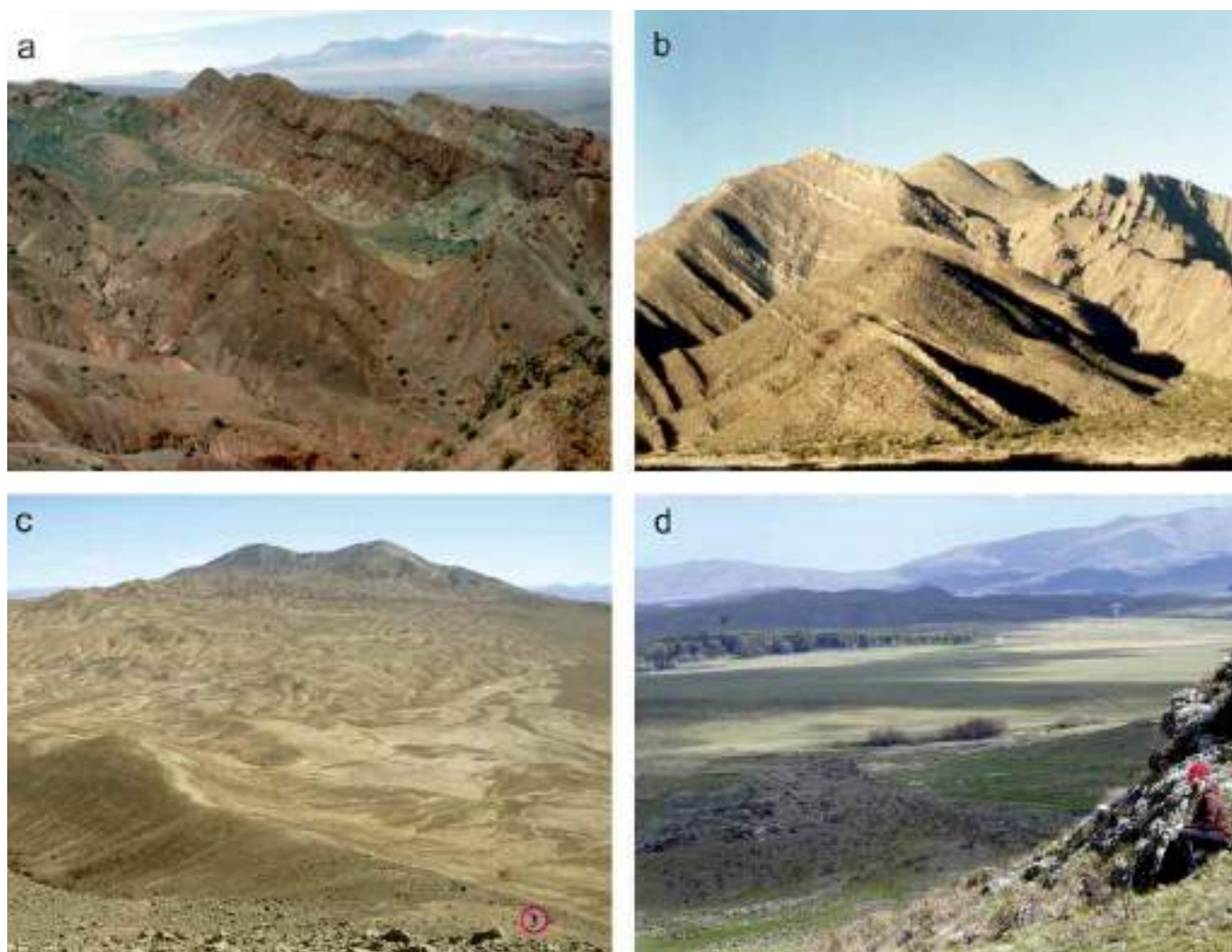


Figura 6. a) Vista hacia el oeste de la sierra de Barreal, provincia de San Juan. El núcleo de la sierra color verdoso y de origen glacial contiene la típica Fauna de *Levipustula*. b) Capas de sedimentos plegados que afloran al oeste de Jagüé, provincia de La Rioja. La fauna de invertebrados marinos hallada en estos sedimentos sugiere climas templados hacia finales del Carbonífero. c) Sedimentos marinos depositados en aguas templadas que se preservan hoy en el Desierto de Atacama (Pérmico). Ver como escala una persona en el círculo. d) Capas de areniscas en Sierra de la Ventana donde aparece la Fauna de *Eurydesma* asociada a la glaciación pérmica (Fotos a y d de G. Cisterna).

Los mares del sur, esos que nacen del frío

Durante el Paleozoico Tardío, las aguas de un antiguo océano Pacífico cubrieron la actual región andina desde el Noroeste Argentino hasta la Patagonia, mostrando un patrón irregular en las diferentes latitudes (Figura 5). Es importante recordar que en aquellos tiempos la Cordillera de los Andes no existía, ya que recién se elevaría millones de años más tarde (ver CICTERRÁNEA 3, “El mar paleozoico de la región Cuyana”). El hallazgo de fósiles de invertebrados marinos en estas regiones, ahora dominadas por montañas, atestigua el avance de este extenso mar. Entre los organismos más abundantes y diversos que lo habitaban, característicos de estos períodos, se destacan los bivalvos (como las almejas que vemos hoy en las playas, ver CICTERRÁNEA 4, “Lo que el mar se llevó... ¡y dejó!”), los gastrópodos o caracoles, los lirios de mar, las esponjas marinas, y también los braquiópodos, no tan conocidos en los mares actuales pero muy abundantes en el Paleozoico.

Durante el Paleozoico tardío, las aguas de un antiguo océano Pacífico cubrieron la actual región andina desde el Noroeste Argentino hasta la Patagonia, mientras que el sector atlántico de nuestro continente sudamericano también fue cubierto por el mar del este, cuando se inundaron los sectores más bajos del centro de Argentina y pequeñas regiones de Patagonia e Islas Malvinas

En particular, en el centro oeste de nuestro país, se acumularon sedimentos carboníferos y pérmicos en una gran cuenca, con una porción interna de depósitos continentales

Las faunas fósiles de los mares helados

Entre la fauna que habitó los mares del Paleozoico tardío dos tipos de organismos fueron muy abundantes y diversos: los bivalvos y los braquiópodos. Estos dos grupos de invertebrados son muy parecidos externamente ya que ambos tienen dos valvas. Los bivalvos, como las almejas o mejillones, son moluscos que aparecen en el Paleozoico y actualmente los podemos encontrar en una gran variedad de ambientes acuáticos, tanto marinos como de agua dulce. Los braquiópodos son un grupo de invertebrados, cuyo auge tuvo lugar en los mares del Paleozoico pero en la actualidad viven pocas especies, la mayoría relegada a ambientes profundos. Numerosos trabajos de investigación estudiaron la relación entre ambos grupos considerando su distribución a través del tiempo, sus preferencias ambientales y la posible competencia por los recursos disponibles en el medio (tanto los braquiópodos, como una gran parte de los bivalvos cuentan con similares mecanismos de alimentación, ya que filtran el agua de su entorno para capturar pequeñas partículas).

Estos dos grupos de invertebrados son comunes en sedimentos del Carbonífero y Pérmico y su registro fósil se ha utilizado frecuentemente para comparar cómo eran las condiciones ambientales en los antiguos océanos del planeta. Por ejemplo, los fríos mares carboníferos del oeste argentino estuvieron habitados por un braquiópodo muy característico llamado *Levipustula levis*, acompañado por otros invertebrados típicos (Fauna de *Levipustula*, Figura 5a y b), los cuales también aparecen en otras regiones hoy lejanas como lo es Australia. En el Pérmico, los mares postglaciales del este se poblaron con una fauna diferente, conocida como Fauna de *Eurydesma* por la abundancia del bivalvo que lleva ese nombre (Figura 5c y d). Gran parte del megacontinente de Gondwana estuvo cubierto por este mar y el registro de esta fauna fue también hallado en cuencas de Sudáfrica, India y Australia.

Por lo tanto, estas faunas fósiles también sirven como indicadores de que diferentes masas de tierra que ahora están geográficamente separadas, en ese momento estaban juntas y eran el hábitat de estos grupos de invertebrados marinos.

llamada Paganzo, y una externa con depósitos marinos y continentales llamada Uspallata-Iglesias (Figura 5). Los glaciares ubicados en las zonas altas de aquel entonces, como la Protoprecordillera, provocaron una erosión muy grande en el terreno, generando profundos valles que se fueron rellenando con espesas capas de sedimentos. Estos profundos paleovalles, se inundaban periódicamente con aguas de salinidad variable, según la proximidad del mar y el aporte de aguas del deshielo. En esta cuenca se registró, a mediados del Carbonífero, el mayor avance del mar del oeste sobre el continente, cuya magnitud estuvo controlada por el relieve y directamente relacionada con los procesos de retroceso y fusión de los glaciares desarrollados en la región.

Analizando distintas características de las rocas que encontramos hoy, como la composición granulométrica (tamaño de grano), espesor y forma de las capas depositadas, disposición del relleno sedimentario en diferentes sectores de las cuencas, es posible reconstruir un paleoambiente marino abierto que alternaba con costas irregulares y dentadas, similares a los fiordos modernos que hoy se observan en el sur de Argentina y de Chile. La fauna característica de esta importante inundación marina relacionada con la fusión de los hielos en la cuenca de Uspallata-Iglesias es conocida como Fauna de *Levipustula* (ver cuadro de texto: Las faunas fósiles de los mares helados y Figura 5).

¡Tan grande fue el avance de este mar sobre el continente durante el Carbonífero, que podemos encontrar invertebrados marinos fósiles (como los que nombramos más arriba) en los alrededores de localidades como Jagüé, Guandacol (La Rioja), Calingasta, Barreal (San Juan) y Uspallata en el noroeste de Mendoza! (Figuras 6a y b).

A inicios del Pérmico, el último período de la Era Paleozoica, el mar comenzó a retirarse de todo el margen occidental de Gondwana. Esta etapa se caracteriza entonces por tener sedimentos continentales con registros de actividad volcánica en algunos sectores. De acuerdo con lo que nos dicen estos sedimentos, el ambiente de ese momento habría estado dominado por ríos, con la presencia de algunos lagos y extensos campos de dunas, que indican un cambio importante en el clima, que se volvió más cálido y más seco, desarrollándose condiciones de gran aridez.

El mar quedó presente solo en algunos sectores del margen andino, desde Chile hasta América del Norte, donde hay evidencias de mares cálidos. Uno de los más imponentes

afloramientos de estas antiguas “playas” tiene lugar en la región de Atacama en Chile y en el Salar de Arizaro en Argentina, donde el paisaje actual, desolado y desértico, potencia su magnitud (Figura 6c).

El sector atlántico de nuestro continente sudamericano también fue cubierto por el mar durante el Carbonífero y aún en el Pérmico, cuando se inundaron los sectores más bajos del centro de Argentina, y pequeñas regiones de Patagonia e Islas Malvinas (Figura 5). Aunque las evidencias de este mar no se encuentran a simple vista en muchos lugares, sino que están mayormente en el subsuelo cubiertas por capas de sedimento de edades más jóvenes. ¡En esas épocas el mar llegó hasta las actuales regiones chaco-paranaense y pampeana! La escasez de afloramientos de estos sedimentos marinos hace que gran parte de la información acerca de la historia geológica de las cuencas de este margen sea menos conocida que las del margen oeste.

El ocaso de la Era Paleozoica tiene lugar en un escenario de grandes cambios en la posición de los continentes junto a una etapa de calentamiento global y megaefecto invernadero que desencadena grandes cambios en la vida marina y terrestre, provocando la mayor de las extinciones registradas en la historia de nuestro planeta

Sin embargo, hay registros muy importantes de la Edad de Hielo del Paleozoico Tardío en la cuenca Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, donde aparecen majestuosamente expuestos. Por ejemplo, en los cordones más orientales de la Sierra de la Ventana se observan espesas capas sedimentarias de origen glacial (diamictitas) y sedimentos más finos con fósiles de invertebrados marinos (Fauna de *Eurydesma*, ver cuadro de texto: Las faunas fósiles de los mares helados y Figura 5). Por encima, y como último registro de estos períodos se encuentran capas que indican ambientes continentales con sedimentos de origen volcánico (Figura 6d).

Con acento cordobés ¿Qué evidencias fósiles de la edad de hielo paleozoica tenemos en nuestra provincia?

En las etapas finales del Paleozoico, en el noroeste cordobés existían ríos y lagos que alternaban con sectores pantanosos, donde habitaban coníferas (parientes lejanos del pino y la araucaria, por ejemplo) y algunos helechos arborescentes. En varios sitios de la provincia de Córdoba (Figura 5) podemos encontrar restos de plantas fósiles de estas épocas, tales como hojas de diversos árboles y también esporas y granos de polen de tamaño microscópico. En algunos casos excepcionales, las hojas fosilizadas preservan además la acción de ciertos insectos que habrían compartido el mismo hábitat.

Un variado registro de esta vegetación de edad carbonífera y pérmica fue hallado en el oeste de la sierra de Pocho (cerca de la localidad de Chancaní) y en las sierras de Serrezuela y Ciénaga del Coro, entre otras regiones. La flora fósil recolectada en los sedimentos cordobeses se encuentra alojada y resguardada dentro de la colección del Museo de Paleontología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Hacia el este de la provincia también hay extensos registros de rocas y fósiles del Carbonífero y Pérmico, pero no son visibles en superficie ya que se encuentran en el subsuelo de la cuenca Chacoparanaense, centenas y hasta miles de metros debajo de la cubierta sedimentaria más reciente. Conocemos algunos datos gracias a una serie de perforaciones de exploración petrolera que permitieron identificar espesas capas de sedimentos continentales, y algunos marinos, vinculadas a la Edad del Hielo del Paleozoico Tardío. Por ejemplo, cerca de Santiago Temple, Yacimientos Carboníferos Fiscales (YCF) realizó perforaciones de hasta 800 metros de profundidad, mientras en las localidades de Ordoñez, Camilo Aldao y Saira los pozos realizados por YCF alcanzaron los 3200 metros de profundidad.

De esas profundidades del subsuelo cordobés provienen granos de polen y esporas fósiles, destacados por su abundancia y buen estado de preservación. La presencia de estos restos permitió realizar comparaciones con rocas carboníferas y pérmicas, no solo de otros lugares de Argentina, sino también de Brasil y Uruguay.

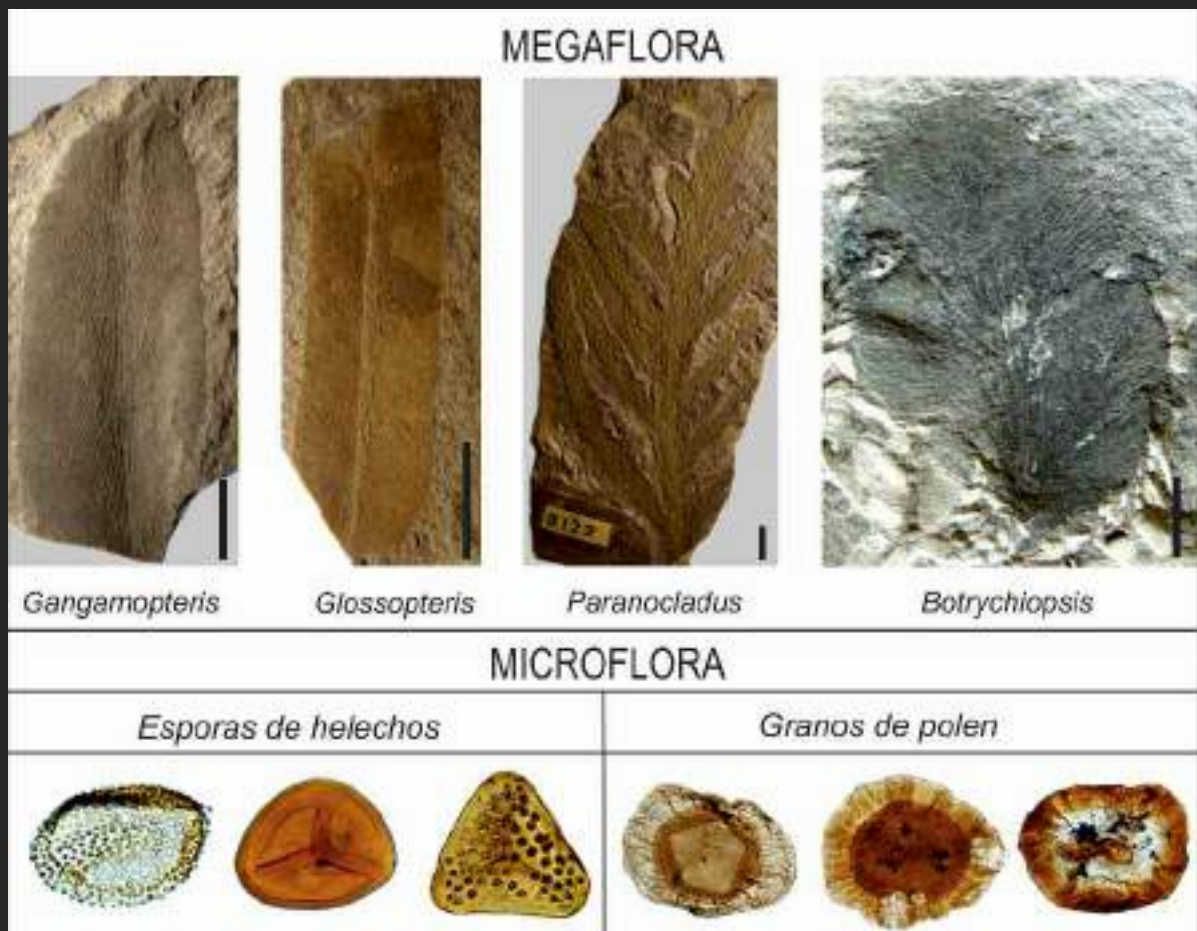


Figura 7. El contenido fósil de la provincia de Córdoba está representado por la vegetación que cubría su superficie durante fines del Paleozoico. Se encontraron hojas fósiles entre las sierras de Serrezuela y Ciénaga del Coro. Las líneas negras equivalen a 1 cm (Fotos de S. Césari). Además, se muestran esporas y granos de polen fósiles estudiados en muestras de subsuelo de la localidad de Santiago Temple. Estos ejemplares tienen entre 20 y 100 micrómetros (Fotos de P. Gutiérrez y L. Balarino).

Un puzzle llamado Pangea

Hacia fines del Pérmico, se registraron nuevos cambios en la disposición de los continentes a nivel global. Ya sin glaciares cubriendo la mayor parte de las tierras emergidas, algunos bloques continentales colisionaron con otros, dando origen a cadenas montañosas como por ejemplo los Montes Urales en la actual Rusia. El desplazamiento de las placas continentales dio lugar a la formación de una única gran masa de tierra: el supercontinente Pangea, rodeado por el océano Pantalasa al oeste y el mar ecuatorial Paleotetis al este (Figura 1).

Este escenario caracteriza el ocaso de la Era Paleozoica y también, el de muchos de sus protagonistas. Comienza una

etapa de calentamiento global y megaefecto invernadero que desencadena grandes cambios en la vida marina y terrestre, provocando la mayor de las extinciones registradas en la historia de nuestro planeta.

Pero este final es también un comienzo, una nueva oportunidad para la vida. Algunos organismos persistieron y otros diferentes se apropiaron de los diversos espacios que proponía un planeta dinámico, abriendo camino y dejando lugar a nuevos organismos que dominaron las Eras Mesozoica y Cenozoica.

G Glosario

Cuenca: Área deprimida o de bajo relieve en la que se acumulan sedimentos.

Diamictita: Es un tipo de roca sedimentaria compuesta por sedimentos mal ordenados cuyos tamaños varían desde arcilla hasta bloques de rocas, suspendidas en una matriz de grano más fino.

Micrómetro: Es una unidad de longitud equivalente a una milésima parte de un milímetro.

RB Referencias bibliográficas/Lecturas sugeridas

Azcuy, C. L., Carrizo, H. A. y Caminos, R. 1999. Carbonífero y Pérmico de las Sierras Pampeanas, Famatina, Precordillera, Cordillera Frontal y Bloque de San Rafael. En: Caminos, R. (ed). Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29: 261-318. Buenos Aires.

Benedetto, J. L. El Paleozoico tardío y la formación de Pangea. Capítulo 6. En: El continente de Gondwana a través del tiempo. Una introducción a la geología histórica. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba. <http://www.librogondwana.com.ar/Index.asp>

Cesari, S. N. 2014. Las floras del Paleozoico Superior. Geología de superficie. 19° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 421-434, Córdoba.

Sánchez, T. M. 2012. La historia de la vida en pocas palabras. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ed.), 206 p. Córdoba.

PLANTEMOS NATIVAS

PLANTEMOS “AROMITOS”

Por Sandra Gordillo

Investigadora Principal de CONICET en IDACOR
(CONICET - UNC)

¿Por qué plantar especies nativas?

Plantar un árbol en el actual contexto de cambio climático, es un gesto compensatorio. De esta manera podemos contribuir a contrarrestar la huella que estamos dejando en el planeta con la emisión de gases de efecto invernadero. Y si es una especie autóctona, es, además, un acto de remediación a los ecosistemas de la región. Bien sabemos que hay regiones, como nuestra provincia de Córdoba, en donde hay una elevadísima tasa de deforestación, que ocupa los primeros puestos a nivel mundial, y que es producto de los modelos de producción dominante. Ante semejante “atrocidad” plantar un árbol puede parecer insignificante, pero la práctica colectiva seguramente no lo es. Y aquí destaco como ejemplo y modelo local el proyecto de Reforestación con tabaquillo en Los Gigantes, que comenzó hace muchos años por iniciativa de una sola persona (Daniel Renison) y que se efectivizó en la práctica con participación de voluntarios que se fueron sumando.

¿Qué ventajas ofrecen las especies nativas?

Muchas. Son formadoras de suelos e importantes en la absorción de agua. Así contribuyen a mantener la fertilidad y proteger las cuencas hídricas. La interacción de nativas en ambientes naturales permite el desarrollo y diversificación de todo el ecosistema. Hay por lo tanto razones ecológicas, pero además hay razones paisajísticas y culturales: belleza escénica, alimentos, medicina, identidad.

-¡Me convencí! ¡Quiero plantar un árbol nativo! ¿Cómo hago?

Al hablar de nativas, hay muchas especies a la hora de elegir. Si el destino final es la vereda, habrá que considerar cuáles son las especies permitidas en cada comuna o municipio, y contar con datos del tamaño y características del árbol adulto. También se pueden hacer arbolitos en serie (en envases temporarios, como etapa intermedia) con otro destino final: escuela, espacio verde, etc.

Un arbolito factible de hacer a partir de semillas, dado su alto poder de germinación, son los “aromitos” que son un conjunto de especies arbóreas de la familia de las Fabáceas con amplia distribución en la provincia. Estas especies, que incluye espinillo (*Vachellia caven*), tusca (*Acacia aroma*) y garabatos (*Acacia praecox*) entre otras más, tienen inflorescencias en forma globosa por la disposición de las pequeñas flores. Esos “pompones” (de un centímetro aproximadamente) son visualmente atractivos y aromáticos, y de allí su denominación. Para cosechar las semillas de espinillo que se muestran en la foto, por ejemplo, podemos colectar los frutos maduros (¡jojo! que no estén verdes) aún en el árbol en otoño, o ya en el suelo, en invierno. Una “desventaja” que tienen en veredas o plazas suelen ser las espinas, pero si se podan las ramas bajas, o a la altura de las personas, pueden ser adecuados.

Otro elemento a tener en cuenta, y que a veces suele olvidarse, es que las semillas de algunas especies del monte necesitan “escarificarse” para acortar el tiempo de germinación. Esta práctica, que consiste en raspar un sector de la cáscara sin dañar el interior de la semilla, suplente los procesos y actividades que se dan en el ambiente silvestre y permiten su germinación natural. Después de eso, contar con envases cortados (botellas de dos litros), sustrato (que incluya tierra y hojarasca) y seguimiento, serán la antesala antes del trasplante al destino final. ¿Cuál será la nativa que vas a plantar? Si elegiste aromito podés seguir el enlace

https://issuu.com/plantemosaromitosnativos/docs/peque_omanualilustrado

¿Qué es el CICTERRA?

Es un centro de investigación en Ciencias de la Tierra dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), vinculado con la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Fue creado por resolución del CONICET el 31 de Mayo de 2007.

¿Qué hacemos?

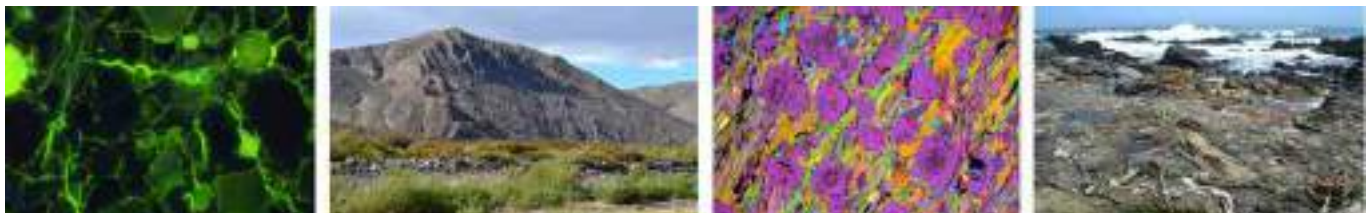
Desarrollamos proyectos de investigación en diferentes temas vinculados con las Ciencias de la Tierra en general, incluyendo Geología Endógena y Exógena, Geoquímica, Geofísica, Paleontología y Paleobiología. Realizamos docencia de grado y de posgrado, actividades de extensión, comunicación pública de la ciencia y transferencia de conocimiento. Efectuamos asesorías técnicas a entidades públicas y empresas privadas.

¿Quiénes somos?

Somos miembros de la Carrera del Investigador Científico y del Personal de Apoyo de CONICET, Profesores e Investigadores de la UNC, Becarios Doctorales y Posdoctorales del CONICET o FONCYT y Personal Administrativo. En la actualidad el CICTERRA cuenta con una planta de más de 100 integrantes. El Centro incluye geólogos, biólogos, químicos, geofísicos y egresados de carreras afines.

Líneas de Investigación

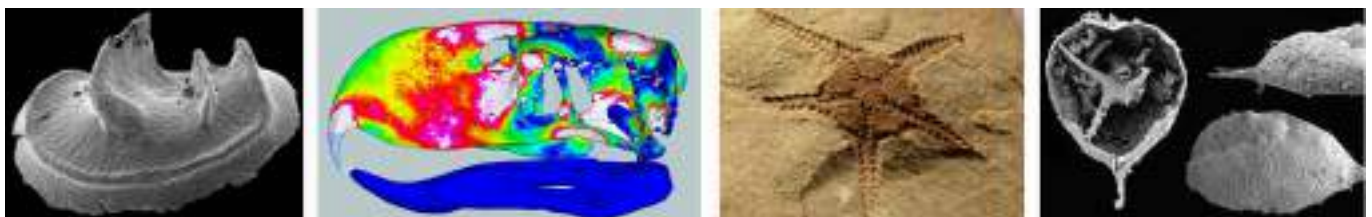
Dinámica de la litósfera – astenósfera



Variabilidad hidroclimática y procesos geo-ambientales



Evolución de la diversidad biológica



Nuestro desafío consiste en comprender una amplia gama de procesos naturales que tienen lugar desde las capas más profundas del planeta hasta su superficie y desde su formación hasta el presente. Aspiramos a que nuestra experiencia y conocimiento sea un aporte al bienestar de la sociedad.



CICTERRÁNEA

Revista de Comunicación de las Ciencias de la Tierra

Nuestro planeta es un sistema dinámico sorprendente. Desentrañar su pasado, entender los procesos actuales y predecir qué podría suceder en el futuro son algunos de los grandes desafíos de las Ciencias de la Tierra. Numerosos fenómenos que ocurren en el planeta tienen una influencia directa en nuestra vida cotidiana. Hoy la sociedad es testigo de controvertidos debates acerca de los cuales las Ciencias de la Tierra tienen mucho que decir. Es nuestra intención ofrecer al lector elementos que contribuyan a reflexionar y forjar una opinión sobre estos temas. Además, comprender cómo funciona este complejo planeta es, simplemente, un placer que esperamos poder transmitir a través de estas páginas.

Ediciones anteriores:



<https://cicterra.conicet.unc.edu.ar/revista-cicterranea/>
<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/cicterranea>

Seguinos en:

