

## POLEN Y ESPORAS FÓSILES DEL EOCENO DE RÍO TURBIO

# FLORA Y CALENTAMIENTO GLOBAL

Descubriendo el impacto del calentamiento global del Eoceno medio en las flores del extremo sur de Patagonia a través del estudio de granos de polen y esporas fósiles.

**Damián A. Fernández**

El cambio climático es una de las problemáticas ambientales más importantes de la actualidad. En particular, el calentamiento global es un fenómeno que preocupa a la sociedad y ocupa a la comunidad científica. Según los modelos climatológicos, las emisiones de gases de efecto invernadero producto de la actividad humana son una de las principales causas del aumento de la temperatura media anual. Brown y Caldeira estiman a través de modelos climatológicos que, de continuar la tendencia actual, hacia fines del siglo XXI la temperatura media anual aumentará entre tres y seis grados centígrados. Como se explica en un artículo de *National Geographic*<sup>1</sup>, la diferencia entre las temperaturas globales durante las edades de hielo y en los períodos templados entre las glaciaciones es tan sólo de cinco grados. Esto implica que la magnitud del calentamiento global provocado por el hombre es muy importante. Mientras la ciencia sigue estudiando este fenómeno para intentar desacelerarlo, es crucial entender qué consecuencias podría tener, si siguiera el ritmo actual, en los seres vivos. Pero, si nos vamos muy atrás en tiempo, estos episodios de calentamiento ¿ya han tenido lugar en la historia de la Tierra? ¿Qué pasó entonces con los ecosistemas?

La Tierra ha experimentado una tendencia general al enfriamiento durante los últimos 50 millones de años, la cual tuvo su punto máximo en una glaciación a escala continental de la Antártida en el límite entre el Eoceno y el Oligoceno (hace 34 millones de años). El Óptimo Climático del Eoceno Medio (o MECO, por sus siglas en inglés) ocurrió hace unos 40 millones de años cuando, según Bijl y colaboradores, se liberaron de

**Palabras clave:** diversidad, fósiles de plantas, óptimo climático, Patagonia, polen y esporas.

**Damián A. Fernández**<sup>1</sup>

Dr. en Ciencias Naturales  
dafernandez@untdf.edu.ar

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias Polares, Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Nacional de Tierra del Fuego. Tierra del Fuego, Argentina

Recibido: 01/05/2021. Aceptado: 20/09/2021.



**Figura 1. Ubicación del área de estudio: alrededores de la ciudad de Río Turbio, una pequeña localidad reconocida por su producción de carbón mineral, al sudoeste de Santa Cruz.**

forma natural grandes cantidades de dióxido de carbono en la atmósfera, y la temperatura de la superficie del mar aumentó hasta seis grados centígrados. Las causas de dicho aumento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera son motivo de estudio y debate. Las hipótesis principales son las erupciones volcánicas o los cambios complejos en el ciclo del carbono. Este evento de calentamiento, ampliamente reconocido por una perturbación en los isótopos estables de oxígeno y carbono analizados en fósiles, duró entre 500.000 y 600.000 años. Como podemos ver, éste fue un proceso similar el que está atravesando nuestro planeta, pero de una escala mucho mayor (ver Recuadro). Para tener un punto de referencia, la especie humana se habría originado hace cerca de 300.000 años; el MECO entonces habría durado el doble que nuestra especie hasta el momento.

<sup>1</sup> El artículo de *National Geographic*, titulado ¿Qué es el calentamiento global?, puede leerse en Internet en <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>

**Figura 2. Trabajo de campo. El autor tomando muestras de roca. En segundo plano se observa la sucesión de sedimentos del Eoceno de la Formación Río Turbio. Por encima, el bosque de ñire (*Nothofagus antarctica*).**



Imagen: gentileza del autor.

Los modelos ecológicos pueden potencialmente predecir el impacto del aumento de la temperatura y el dióxido de carbono atmosférico en la diversidad de especies. Sin embargo, es importante destacar que sólo el registro fósil proporciona evidencia empírica sobre cómo la biodiversidad se ve afectada por las transiciones climáticas a largo plazo.

Por ejemplo, se sabe que las floras fósiles alcanzaron su punto máximo de diversidad durante episodios anteriores de altas temperaturas, ya sea en el Eoceno temprano (52 millones de años) de la Provincia de Río Negro o en el Eoceno Medio (45 millones de años) del norte de Colombia como muestran, entre otros, los trabajos de Wilf y Jaramillo respectivamente. El MECO también habría afectado a la vida terrestre; sin embargo, la magnitud de esta respuesta era hasta el momento desconocida para la ciencia, ya que la mayoría de los datos publicados se habían centrado en el ambiente marino. Hasta el momento no estaba claro si durante el MECO la diversidad de los seres vivos aumentó, si los

reemplazos en las floras fueron graduales o repentinos, o si los inmigrantes subtropicales y tropicales fueron frecuentes en el extremo sur de la Patagonia.

Para mejorar el entendimiento de estos procesos un equipo de científicos y científicas del CONICET, liderados por la doctora Viviana Barreda, analizamos cuantitativamente los cambios en la diversidad de las plantas, sobre la base del análisis de esporas y granos de polen fósiles conservados en rocas de los alrededores de la ciudad de Río Turbio (suroeste de la provincia de Santa Cruz, Argentina) (ver Figura 1).

Estas rocas abarcan tanto el MECO como los momentos inmediatamente anteriores y posteriores (desde un punto de vista geológico). Nuestro estudio refuerza la importancia del registro de polen y esporas fósiles para explorar las tendencias de diversidad pasadas y representa una nueva imagen explícita de cómo las floras respondieron a un evento de invernadero en el extremo sur de América del Sur.

### Una cuestión de escala

Como podemos ver, el efecto invernadero, el calentamiento global y la aridización, son procesos que se han dado naturalmente en la historia de la Tierra. Es importante estudiar la evidencia fósil para entender qué consecuencias tuvieron esos cambios en el ambiente sobre los seres vivos. Debemos destacar que el evento de calentamiento que estudiamos se dio a lo largo de cientos de miles de años. Tenemos cada vez más evidencia de que la actividad humana (de forma consciente y -por lo tanto- responsable) está provocando un aumento de temperatura similar, aunque en un lapso de décadas. Esto tiene un efecto muy negativo en la biosfera porque está cambiando el clima tan rápidamente, que algunos seres vivos no pueden adaptarse, y, entonces, podrían extinguirse. De la misma manera, un clima nuevo y más impredecible impone retos únicos para todo tipo de vida.

### Cómo lo hicimos

En este preciso momento en donde se encuentre el lector, están flotando en el aire y lentamente van cayendo al suelo, granos de polen y esporas. Por suerte para quienes las estudiamos, estas estructuras vegetales microscópicas son muy resistentes. Así que luego de millones de años pueden quedar preservadas en los sedimentos finos que ahora son rocas. Gracias a estudios paralelos podemos saber qué edad tienen esos sedimentos. De esa forma, reuniendo la información de diferentes rocas y lugares, los palinólogos (ver Glosario) podemos entender procesos ecológicos de gran envergadura. Parte del equipo de la Dra. Barreda partió desde el Museo Argentino de Ciencias Naturales de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires hacia Río Turbio en el suroeste de Santa Cruz. El viaje tomó tres días. Con la piqueta tomamos 53 muestras en los alrededores de la ciudad (ver Figura 2). Las llevamos al museo y las disolvimos atacándolas con ácidos muy fuertes. Increíblemente, lo único que sobrevive a este peligroso proceso son los granos de polen y las esporas.



Imagen: gentileza del autor.

**Figura 3. Grano de polen fósil afín a la lenga (en la imagen grande). Estos granos fueron producidos por especies muy cercanas de la lenga, el ñire y el guindo, que vivieron en Río Turbio entre los 46 y 36 millones de años. El grano tiene unos 30  $\mu\text{m}$  de diámetro.**

A partir de unos gramos de roca obtuvimos un frasquito con agua conteniendo cientos de miles de microfósiles resistentes a los ácidos. Para cada muestra de roca hicimos al menos un preparado para el microscopio óptico (como los que hay en escuelas y universidades). Estudiando la forma y la diversidad de estos microfósiles pudimos saber qué plantas los produjeron y así reconstruir la flora de la región. También usamos fósiles de quistes de dinoflagelados (algas dinofíceas) (ver Glosario) para restringir la edad de las rocas que estudiamos. Al estudiar una sucesión de rocas, desde las más antiguas (de unos 46 millones de años en este estudio) a las más jóvenes (unos 36 millones de años), pudimos ver cómo fue cambiando la flora en ese lapso.

Contamos al menos 300 granos de polen y esporas por muestra. Así como también todos los dinoquistes que aparecieron. Además, tomamos muchas fotos con la cámara del microscopio. Estudiamos en total unos 20.000 microfósiles. Seleccionamos 32 de las 50 muestras que fueran comparables entre sí por el tipo de roca y por el proceso por el cual se habrían formado. Por ejemplo, las vetas de carbón se eliminaron del análisis, por representar una flora muy local, a diferencia de las rocas formadas en ambientes marinos poco profundos que conservan evidencia de una flora regional (cuyos granos de polen y esporas llegan al mar a través de los ríos y arroyos). Se utilizaron rocas formadas en ambientes marinos someros. Los granos de polen y esporas fueron colocados en una matriz de 32 niveles por 117 especies. A partir de esta gran fuente de datos pudimos realizar una serie de análisis estadísticos que nos permitieron estimar cómo variaban las especies vegetales a lo largo del tiempo representado en la Formación Río Turbio. Este trabajo tomó 11 años; del mismo surgieron una tesis doctoral y una serie de trabajos científicos, y culminó en plena pandemia con una publicación en *Communications Biology* (Springer Nature).

### Qué descubrimos

Basándonos en nuestro análisis de la abundancia relativa entre microfósiles continentales (polen y esporas) y marinos (dinoquistes) detectamos tres grupos principales de muestras. Dichos grupos están definidos por cambios en la cantidad de la especie de quiste de dinoflagelado dominante, *Enneadocysta dictyostila*. Se trata de una especie clave del MECO en las latitudes más australes del Planeta. Los tres grupos de muestras detectados representan distintos intervalos de tiempo: pre-MECO (entre 47 y 46 millones de años); MECO (entre 41 y 36 millones de años), caracterizado por el predominio de la especie *Enneadocysta dictyostila*, que aumenta hasta un 95% en algunas de estas muestras; y post-MECO (entre 36 y 26 millones de años). Entre los microfósiles continentales, identificamos 117 especies de esporas y granos de polen representadas por dos musgos, tres licófitas (familiares del licopodio) (ver Glosario), 25 helechos, 11 gimnospermas (familias de las araucarias, los cipreses y los mañiú) y 76 angiospermas (plantas con flor). Usamos estos granos de polen y esporas de ambientes terrestres para estimar empíricamente la biodiversidad y explorar las principales tendencias en la vegetación en los tres intervalos detectados según la frecuencia de las especies de dinoquistes.

Nuestros análisis muestran que todos los intervalos conservan floras relativamente ricas en especies. Tres análisis estadísticos coincidieron en detectar un aumento de hasta un 40% en el número de especies en el calentamiento desde el pre-MECO al MECO, y una disminución de hasta un 40% en la baja de las temperaturas entre el MECO al post-MECO (ver Figura 7). Además, dentro del MECO, reconocimos tres subgrupos menores de muestras donde detectamos una clara relación inversa entre la abundancia de helechos y angiospermas. Es decir, al comienzo del MECO, los helechos aumentaron considerablemente en abundancia

**Figura 4. Grano de polen fósil afín al mañiú macho (en la imagen grande). Nótese que el grano tiene un cuerpo y dos sacos, como un globo aerostático doble, que le permitían flotar en el aire en busca de otra planta para fecundar. Cada saco mide unos 15  $\mu\text{m}$  de diámetro.**



Imagen: P. Thmas.

(alrededor del 60% del total de especies encontradas) siendo las familias de helechos arborescentes (con porte de palmeras bajas) las más frecuentes.

En este pico de helechos, la abundancia de angiospermas disminuyó drásticamente (del 70% al 30%). En el subgrupo medio del MECO, los helechos cayeron al mínimo, mientras que las angiospermas se volvieron dominantes (80%). Aparte de especies de la familia de la lenga y del coihue (ver Figura 3) y la familia del mañiú macho (Podocarpaceae; ver Figura 4), otras familias como la del arrayán (Myrtaceae) y la del notro (Proteaceae) se convirtieron en elementos importantes. Hacia finales del MECO los helechos volvieron a subir a valores máximos (alrededor del 60%) mientras que las angiospermas disminuyeron al mismo tiempo.

Los grupos de plantas que crecen actualmente en zonas subtropicales y tropicales fueron comunes a lo largo de todo el lapso estudiado, en particular palmeras (ver Figura 5), familia donde está la yerba (Aquifoliaceae) (ver Figura 6), subfamilia a la que pertenece el palo borracho (Bombacoideae), una familia de enredaderas

tropicales (Malpighiaceae), entre muchas otras.

### Qué implica lo que encontramos

Es evidente que las floras más australes de América se vieron afectadas por el efecto invernadero del Eoceno medio. Encontramos evidencia que respalda que la riqueza vegetal aumentó junto con el incremento de las temperaturas globales y el dióxido de carbono atmosférico. Aunque las estimaciones de la riqueza de especies realizadas en zonas más ecuatoriales, como Colombia, son considerablemente más altas que las reportadas en la Patagonia, la magnitud de este incremento es bastante similar (más del 35%) basado en nuestros análisis. La enorme diferencia en la riqueza vegetal entre las latitudes más bajas ( $\sim 6^\circ\text{N}$ ) y más altas ( $\sim 51^\circ\text{S}$ ) de América del Sur (más del doble) nos lleva a asumir que el gradiente de diversidad latitudinal (ver Glosario) ya estaba bien establecido en América del Sur a mediados del Eoceno. Esto es previo a la principal glaciación cenozoica de la Antártida cerca del límite entre el Eoceno y el Oligoceno (hace aproximadamente



**Figura 5: . Grano de polen fósil afín a las palmeras (familia Arecaceae). En la imagen se ilustra el pindó (*Syagrus romanzoffiana*). Este grano de polen fósil con forma de bote de unos 45  $\mu\text{m}$  de largo y con una ornamentación como una red muy fina en su superficie, también fue encontrada en el Eoceno de Colombia.**

Imagen: gentileza del autor.

Imagen: gentileza del autor.

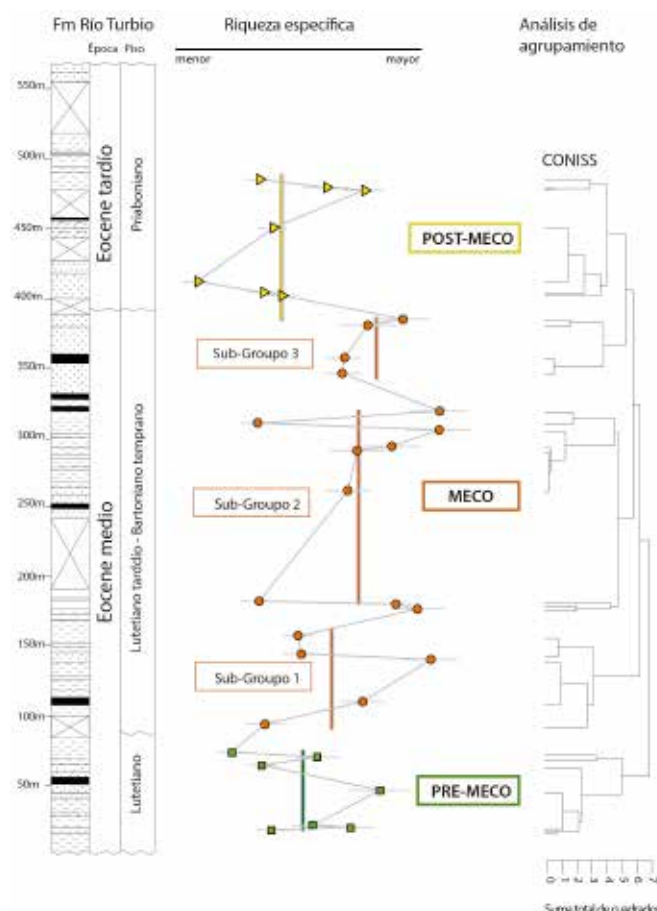


**Figura 6. Grano de polen fósil afín al género al que pertenece la yerba mate (*Ilex paraguariensis*, en la imagen). Estos granos de polen presentan su superficie cubierta de ornamentaciones como clavos de unos 2 o 3  $\mu\text{m}$  de largo.**

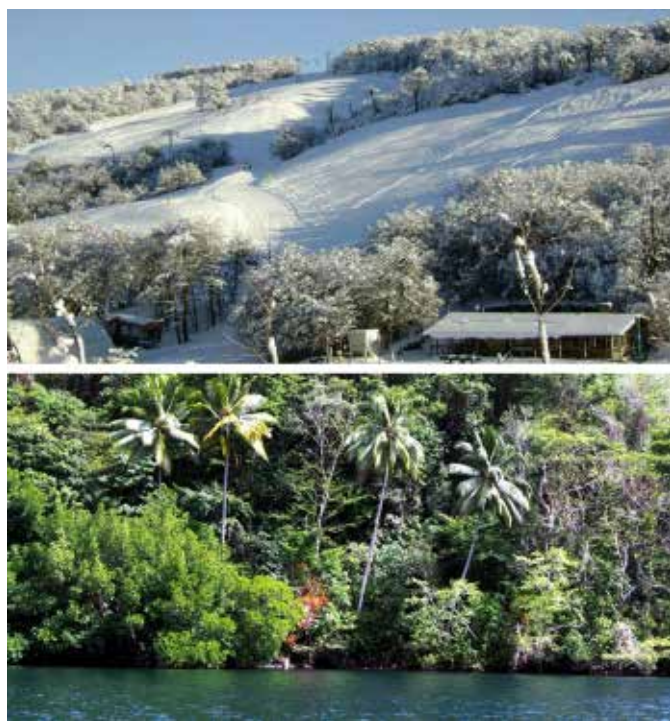
34 millones de años), una época de rápido enfriamiento global y cambio pronunciado en el clima de la Tierra. Nuestras paleofloras (ver Glosario) de alta latitud sur, incluso durante el MECO, están dominadas por familias como las Podocarpaceae, Nothofagaceae, Proteaceae y Myrtaceae. Estos linajes (ver Glosario), llamados gondwánicos, comprenden alrededor del 30% de la diversidad total del Eoceno medio en el sur de la Patagonia, y esta cifra aumentó durante los eventos de enfriamiento global hasta un 50%, como muestran nuestros trabajos previos.

El contexto climático del Eoceno medio promovió la dispersión de taxones (ver Glosario) subtropicales o tropicales hacia el sur (ver Figura 8). Por ejemplo, documentamos cuatro tipos de granos de polen de palmeras, como así también angiospermas y helechos de grupos que hoy crecen en zonas mucho más cálidas, y que hoy no se encuentran en la Patagonia. Algunos de estos grupos también se han documentado sobre la base del registro de hojas y troncos fósiles de la Formación Río Turbio. Los subsiguientes eventos de enfriamiento y aridificación del Oligoceno (de 34 a 23 millones de años) y, particularmente, del Mioceno (entre 23 y 5 millones de años) empujaron hacia el norte estos taxones de afinidad subtropical y tropical. En general, nuestros estudios demuestran que el mundo cálido del Eoceno medio favoreció la migración de especies neotropicales a las latitudes más altas. La combinación de estos migrantes neotropicales junto con la persistencia de los nativos del sur puede haber desencadenado el aumento gradual de la diversidad que observamos en el MECO. Curiosamente, nuestro pico de diversidad del Eoceno medio coincide con el patrón visto por Woodburne y colaboradores en la fauna de mamíferos de América del Sur, que registra las estimaciones de riqueza más altas para los últimos 65 millones de años en la Patagonia.

La evidencia sobre cómo cambiaron los patrones de lluvia en los continentes durante el MECO es escasa.



**Figura 7. Diversidad polínica a lo largo de la Formación Río Turbio. La columna de la izquierda muestra la antigüedad de cada muestra: más profundo (más abajo), más antiguo. En el centro se muestra la riqueza específica de cada muestra (es un valor muy similar al número de especies de granos de polen y esporas): hacia la izquierda, muestras menos diversas; a la derecha, muestras más diversas. Las barras verticales denotan la diversidad media dentro de cada grupo principal de muestras definidos a partir del análisis de agrupamientos. A la derecha se muestra un análisis de agrupamientos, representa la similitud entre las muestras por su contenido de granos de polen y esporas. Modificado de Fernández et al. 2021.**



**Figura 8. Arriba: paisaje de Río Turbio en la actualidad, con una temperatura media anual de 5,7°C. Abajo: reconstrucción del paisaje en Río Turbio en el Eoceno. Se aprecian familiares de la lenga junto a palmeras en la costa de un mar somero. El clima era similar al de Misiones en la actualidad.**

Estudios sobre suelos preservados en las rocas del oeste de América del Norte y del sur de América del Sur indicaron que, durante este evento de calentamiento, prevalecieron las condiciones subhúmedas o semiáridas, respectivamente. Análisis geológicos y de polen del noroeste de China indican un rápido proceso de aridificación en el MECO. Nuestro análisis detecta una fuerte reducción de los grupos de plantas que demandan humedad, junto con un aumento de las angiospermas tolerantes a la aridez (por ejemplo, familiares del notro y del eucalipto), lo que sugiere condiciones subhúmedas en el cenit terrestre del MECO. Sin embargo, el inicio y el final del MECO se caracterizaron por picos en abundancia

## Resumen

Hace unos 40 millones de años tuvo lugar un episodio de calentamiento del planeta, el Óptimo Climático del Eoceno Medio (MECO). Cuantificamos la respuesta de las floras de las latitudes más australes de América en base al análisis de más de 20.000 microfósiles de plantas y algas de la Patagonia austral. Nuestros análisis indican que durante el MECO estas floras fueron en promedio un 40% más diversas. El alto dióxido de carbono atmosférico y el aumento de las temperaturas pudieron haber favorecido la migración de especies neotropicales hacia la Patagonia austral, lo que explica en parte la alta diversidad que observamos durante el MECO.

de helechos (hasta 60%), junto con otras plantas que exigen humedad, lo que indica condiciones húmedas a hiperhúmedas. Queda por probar, en futuros trabajos, si estos cambios en la humedad están relacionados o no con condiciones regionales o globales.

Los fósiles que revelan la respuesta de la flora al calentamiento durante el MECO nos permitieron estimar la magnitud de este aumento en la diversidad en las latitudes más australes de América. En particular, inferimos que las condiciones del efecto invernadero promovieron la diversificación de las floras australes, aunque la riqueza de plantas en esta región fue notablemente más baja que la de sus contrapartes de latitudes bajas. La posterior glaciación antártica (Oligoceno temprano) y la aridificación generalizada (Mioceno tardío) pueden incluso haber acentuado tal diferencia al empobrecer gradualmente las biotas patagónicas. Nuestro estudio muestra que, en el sur de la Patagonia, ha habido un cambio masivo desde los ricos biomas de selva tropical del Eoceno medio hacia los paisajes actuales dominados por las estepas.

## Glosario

**Dinoflagelados:** extenso grupo de protistas flagelados, con unas 2.400 especies conocidas. Estos microorganismos son unicelulares y forman parte del fitoplancton.

**Gradiente de diversidad latitudinal:** patrón ecológico en el que la riqueza de especies aumenta desde los polos hacia el ecuador en una gran variedad de especies terrestres y oceánicas.

**Licófitas:** plantas vasculares con hojas muy simples (llamadas microfílos) que se reproducen por esporas.

**Linajes:** en paleontología, línea de ascendencia o descendencia de un grupo de seres vivos reconocible en el registro fósil.

**Paleoflora:** flora del pasado con una antigüedad mayor a 10 mil años.

**Palinólogo:** especialista en palinología, ciencia que estudia restos orgánicos microscópicos resistentes a los ácidos. Entre ellos se destacan los granos de polen y las esporas en el registro fósil.

**Taxón:** cualquier grupo de una clasificación científica. Por ejemplo *Erythrina crista-galli*, la especie a la que pertenece el ceibo, es un taxón.

## Para ampliar este tema

National Geographic. ¿Qué es el calentamiento global? [Disponible en Internet].

In a nutshell. ¿Es demasiado tarde para detener el cambio climático? Bueno, es complicado. [Disponible en Internet].

Paleobotánica. Ciencia Hoy. Volumen 26. Revista 154. Paleobotánica. [Disponible en Internet].