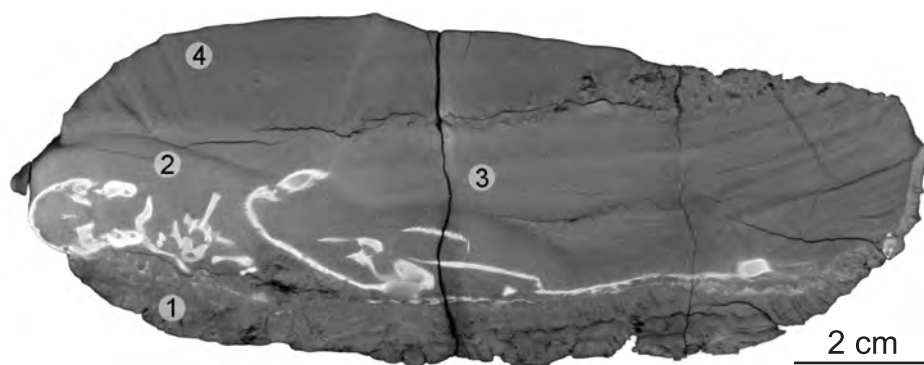


MARIANA MASTACHE MALDONADO

La Tierra ardiente: una crónica del calor que casi lo borra todo

Nuestro planeta tiene la costumbre de reinventarse. Lo ha hecho una y otra vez durante 4500 millones de años por medio de glaciaciones que enterraron ecosistemas enteros bajo kilómetros de hielo, de derivas que partieron y reunieron masas continentales como arcilla en manos indecisas, de una atmósfera que cambió de composición tan drásticamente que habría resultado letal para cualquier criatura actual. Frente a todo ello, somos una especie geológicamente nueva (hemos sido parte tan sólo del 0.007%



Vista longitudinal de la madriguera fosilizada con cuatro fases de sedimentos, 2013. Las imágenes fueron tomadas de “Synchrotron Reveals Early Triassic Odd Couple” © 4.0.

de esa historia)¹ y el mundo que habitamos conserva las marcas de extinciones masivas² que apenas podemos imaginar.

Una de las extinciones más asombrosas ocurrió hace 252 millones de años, al final del Pérmico. Hubo más de un responsable, pero la evidencia apunta, en buena medida, a las trampas siberianas, que son acumulaciones colosales de roca volcánica. Imaginarlas como masas inertes y de color gris apagado sería un error. En su momento fueron magma incandescente que emergió como lava fluida y chisporroteante. Así, territorios enteros fueron engullidos por su propia geología.

La lava es tres veces más densa que el agua y tan caliente —su temperatura supera los 700 °C— que destruye todo lo que toca a su paso. Lo que no sucumbió a ella, lo haría ante los gases venenosos liberados durante las erupciones que, al combinarse con la humedad del aire, producían

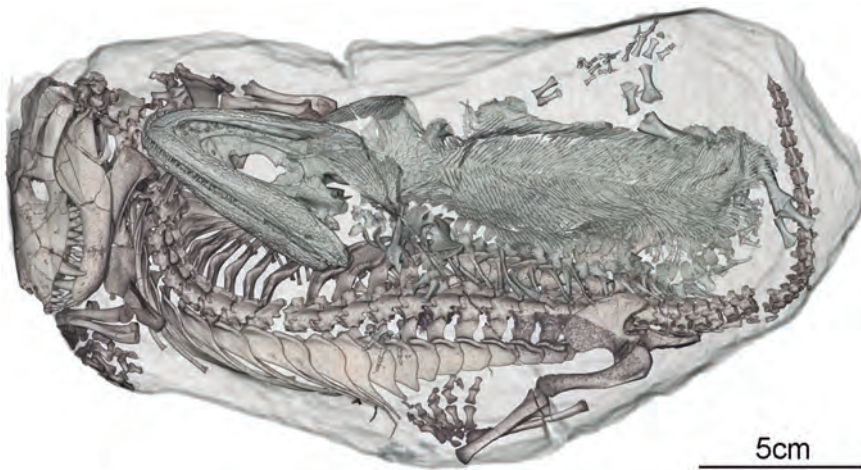
una lluvia tan ácida que arrancaba la vegetación como quien despega un parche de velcro. Horizontes de helechos arborescentes, coníferas primitivas y cordaitales fueron calcinados desde sus raíces por una atmósfera que dejó de ser habitable.

El impacto fue tan devastador que la paleobiología bautizó este episodio como “la Gran Mortandad”. El mote es atinado: en un pestañeo (geológico), hasta el 94 % de las especies marinas y cerca del 70 % de los vertebrados terrestres desaparecieron.³ Ramas evolutivas enteras fueron arrancadas y no se recuperarán jamás. Los bosques tropicales —entonces, como ahora, reguladores climáticos— colapsaron casi por completo.⁴ Tras ese embate, quedó un mundo seco e inestable.

La era mesozoica (sí, ésa que más tarde sería dominada por los dinosaurios) daba sus primeros pasos. Pero su inicio no tuvo nada de apacible. El aire pesaba más, no metafóricamente. Con seis veces más CO₂ que hoy, el efecto invernadero convertía la atmósfera en

- 1 Gil Oliveira, “Earth History in Your Hand”, *Carnegie Museum of Natural History*.
- 2 En una extinción masiva, al menos el 75 % de las especies se extinguen en un periodo de tiempo relativamente corto (según el estándar geológico), normalmente, en menos de dos millones de años. Hannah Ritchie, “There have been five mass extinctions in Earth’s history”, *Our World in Data*, 30 de noviembre de 2022.

- 3 Jacopo dal Corso *et al.*, “Environmental crises at the Permian–Triassic mass extinction”, *Nature Reviews Earth & Environment*, núm. 3, 2022, pp. 197–214.
- 4 Zhen Xu *et al.*, “Early Triassic super-greenhouse climate driven by vegetation collapse”, *Nature Communications*, vol. 16, núm. 1, 2025.



Diseño 3D de la madriguera con Trino [*Thrinaxodon liorhinus*] en marrón y Bruno [*Broomistega putterilli*] en gris, 2013.

una trampa de calor. El planeta entero se metamorfoseó en un horno sin válvula de escape.

“La formación del supercontinente Pangea, con su enorme masa terrestre, redujo la influencia moderadora de los océanos, que mantenían algunas partes de la Tierra húmedas y frescas”, me explica Sergio González Mora, doctor en Ciencias por la UNAM y experto en paleobiología. La Tierra perdió parte de su capacidad para enfriarse.

No era, por decirlo suavemente, un lugar fácil para vivir.

LA VIDA DESPUÉS DE PERDERLO (CASI) TODO

Lo que hace especialmente ominoso este periodo es que la recuperación de los ecosistemas fue sabotada repetidamente. Durante el Triásico temprano, cada tanto, nuevos pulsos de vulcanismo disparaban el CO₂ y la temperatura.

Registros en lo que hoy es China, Siberia y Gondwana —el antiguo supercontinente que reunía a Sudamérica, África, India, Australia, la Antártida, Madagascar y Nueva Zelanda— nos muestran lo que parece ser el colapso general de la vegetación en ese tiempo. Y es

que, durante millones de años, prácticamente no se formaron depósitos de carbón, esa materia vegetal muerta acumulada durante milenios en pantanos y turberas. Para que se forme, se necesita vegetación densa y condiciones de preservación. Su ausencia, según la geología, implica que tal vez no hubo entonces bosques suficientemente densos ni duraderos.⁵ A la larga, eso traería consigo una erosión química y física intensísima⁶ —como sucede en la actualidad en varias zonas deforestadas.

Al imaginar las condiciones de esa época, quizá pensemos que la humedad abandonó en un chasquido el planeta. Pero no fue así. Las lluvias no desaparecieron de un momento a otro; se volvieron erráticas y violentas. Caían sobre suelos sin vegetación, incapaces de retener el agua. Luego seguían largos pe-

5 Gregory J. Retallack *et al.*, “Multiple Early Triassic greenhouse crises impeded recovery from Late Permian mass extinction”, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 308, núm. 1 y 2, 2011, pp. 233-251.

6 T. D. Frank *et al.*, “Pace, magnitude, and nature of terrestrial climate change through the end-Permian extinction in southeastern Gondwana”, *Geology*, vol. 49, núm. 9, 2021, pp. 1089-1095.

riodos de sequía. Con el tiempo, el paisaje continental se despojaría de la diversidad y de su verde tapiz natural para mostrar rocas expuestas, llanuras áridas y valles devastados por torrentes estacionales. Aquellas latitudes que habían sido húmedas y boscosas se tornaron cálidas y secas. La aridificación fue gradual, aunque persistente.⁷ La Tierra quedó desierta.

En los océanos, la situación no era mejor. El agua caliente retiene menos oxígeno. Las profundidades, saturadas de sulfuro de hidrógeno, eran cementerios.⁸ Casi se detuvo la circulación oceánica. Las temperaturas del mar tropical quizá superaron el umbral metabólico⁹ de la mayoría de los organismos marinos,¹⁰ lo que hizo prácticamente imposible que sus enzimas funcionaran, que su sangre transportara oxígeno o que sus huevos se desarrollaran. Era, en muchos sentidos, un medio hostil para la vida compleja, que terminaría por cederle espacio, nuevamente, a las bacterias y cianobacterias¹¹. La Tierra rebobinó, parcialmente, su propia historia biológica.

- 7 V. I. Davydov *et al.*, "Climate and biotic evolution during the Permian-Triassic transition in the temperate Northern Hemisphere, Kuznetsk Basin, Siberia, Russia", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 573, 2021.
- 8 Jeffrey T. Kiehl y Christine A. Shields, "Climate simulation of the latest Permian: Implications for mass extinction", *Geology*, vol. 33, núm. 9, 2005, pp. 757-760.
- 9 Yadong Sun *et al.*, "Lethally Hot Temperatures During the Early Triassic Greenhouse", *Science*, vol. 338, núm. 6105, pp. 366-370.
- 10 Michael J. Benton, "Hyperthermal-driven mass extinctions: killing models during the Permian-Triassic mass extinction", *Philosophical transactions of the Royal Society A*, vol. 376., núm. 2130, 2018.
- 11 Adam D. Woods *et al.*, "Hyperthermal-driven anoxia and reduced productivity in the aftermath of the Permian-Triassic mass extinction: a case study from Western Canada", *Frontiers in Earth Science*, vol. 11, 2023.

Y pese a que la recuperación de los ecosistemas tardó entre cinco y diez millones de años (el periodo más largo conocido tras una extinción masiva), la vida se abrió paso.

BIGOTES Y ELECTRONES

Quizá una de las historias más memorables que nos dejó el registro fósil sobre este *inferno* prehistórico es la de sus sobrevivientes y cómo hicieron de un planeta climáticamente anárquico su hogar.

Hay un caso muy destacado, tanto por atípico como por la resiliencia de sus protagonistas. Entre los contados sobrevivientes de la extinción estaban los terápsidos, un grupo muy diverso de vertebrados de cuatro patas. Durante mucho tiempo, fueron clasificados como reptiles, aunque hoy sabemos que forman parte de la línea que dio origen a los mamíferos. Técnicamente, podemos decir que hay algo de terápsido en cada uno de nosotros.

Thrinaxodon (llamémosle Trino) fue un terápsido de tamaño comparable al de un zorro pequeño actual (sin contar la cola). Posiblemente estaba cubierto de pelo y vibrisas, que le habrían ayudado a regular su temperatura corporal, y tenía dientes diferenciados, para cortar y moler el alimento, además de un metabolismo superior que el de sus contemporáneos reptiles. Esta combinación era, en el Triásico, una ventaja considerable, pero también suponía una mayor demanda energética. Y si algo era necesario en ese mundo de recursos limitados, eran nuevas estrategias.

Así, ante el calor hostil y sofocante, los depredadores oportunistas y una competencia feroz por alimento y refugio, muchos animales encontraron en el subsuelo una solución. El comportamiento fosorial, o sea, la capacidad de cavar y habitar madrigueras, se convir-

tió en una respuesta adaptativa que Trino y demás seres desarrollaron¹² (incluso antes de la extinción).¹³ Bajo tierra, las temperaturas eran más estables, la humedad se conservaba mejor y los peligros externos disminuían. Fue precisamente una de esas madrigueras triásicas la que conservó la historia de Trino hasta nuestros días.

En 1975, en la provincia costera sudafricana de KwaZulu-Natal, se encontró el molde fosilizado de una madriguera triásica y, dentro, una pequeña porción de un cráneo atribuida tentativamente a *Thrinaxodon*. No fue sino hasta 2013 cuando el investigador Vincent Fernández y su equipo trasladaron la muestra al Laboratorio Europeo de Radiación Sincrotrón en Grenoble, Francia, donde aceleraron electrones a velocidades cercanas a la de la luz para producir imágenes de un detalle microscópico sin necesidad de romper el fósil. Como una radiografía, pero de una potencia tal que nos permite leer el interior de una piedra.

Al ver el escaneo, notaron que Trino tenía compañía.¹⁴ No era otro terápido. A su lado, yacía un anfibio del género *Broomistega* (aquí le diremos Bruno), perteneciente, me cuenta Sergio, a los temnospóndilos; un grupo extinto muy diferente de los anfibios actuales. La cabeza de Bruno era ancha y aplanada, tenía los ojos en la parte superior de ésta y un cuerpo compacto de unos treinta centímetros.

UN DESCANSO Y VISITAS INESPERADAS

El hallazgo que arrojó el escaneo fue motivo de emoción, pues no sólo se había identificado al escultor de esa madriguera (o sea, Trino), sino también a su inesperado acompañante. ¿Qué interacción tuvieron? ¿Era Bruno la presa de Trino? Por un tiempo circuló la imagen melosa de un “abrazo final”, dos criaturas refugiadas juntas ante una inundación fatal. Los titulares lo celebraron como “el abrazo triásico”.

La realidad, como suele ocurrir, fue más extraña y más interesante.

El escaneo del sincrotrón mostró a Trino en una postura característica de descanso que recuerda a la que adoptan muchos mamíferos actuales: curvado contra la pared de la madriguera, con las extremidades junto al cráneo. Bruno llegó, aparentemente, con costillas rotas en proceso de curación; herido, vulnerable y en busca de refugio mientras sanaba. Hoy, la conclusión más aceptada es que Trino ni siquiera advirtió su presencia. El argumento se refuerza con otros ejemplares¹⁵ de *Thrinaxodon* hallados en posiciones semejantes dentro de sus madrigueras. Así que, por ahora, todo sugiere que Trino tomaba una profunda siesta cuando Bruno irrumpió en el terroso refugio.

“Lo más probable es que se encontrara en un estado similar a la hibernación, pero propio de los climas cálidos: la *estivación*”, explica Sergio. Ésta, detalla el investigador, es un letargo o torpor fisiológico que ayuda a subsistir ante

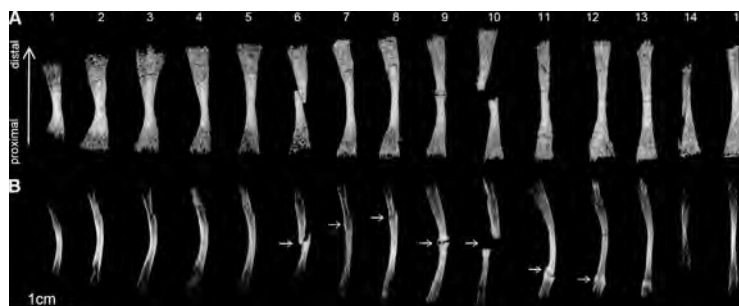
12 Heitor Francischini *et al.*, “Burrows provided shelter for tetrapods in a Permo-Triassic desert”, *Papers in Palaeontology*, vol. 9, núm. 2, 2023.

13 Ross Damiani *et al.*, “Earliest evidence of cynodont burrowing”, *Proceedings. Biological sciences*, vol. 270, núm. 1525, pp. 1747-1751.

14 Vincent Fernandez *et al.*, “Synchrotron Reveals Early Triassic Odd Couple: Injured Amphibian and Aestivating Therapsid Share Burrow”, *PLoS ONE*, vol. 8, núm. 6, 2013.

15 Roger Smith y Jennifer Botha, “The recovery of terrestrial vertebrate diversity in the South African Karoo Basin after the end-Permian extinction”, *Comptes Rendus Palevol*, vol. 4, núm. 6-7, 2005, pp. 623-636; A. S. Brink, “Note on a new skeleton of *Thrinaxodon Liorhinus*”, Bernard Price Institute for Palaeontological Research, vol. 6, julio de 1959, pp. 15-22.

A) Diseño 3D de las costillas anteriores a posteriores en perspectiva dorsal y B) Radiografía virtual de las costillas en perspectiva anterior, 2013.



condiciones de sequía y calor (el pan de cada día a inicios del Triásico). De hecho, aún es posible observarlo en cocodrilos, caracoles y anfibios de nuestra era.

La escena completa sería que Trino, sumido en su torpor, no reaccionó ante el allanamiento y, durante el tiempo que compartieron ese reducido espacio, el juvenil Bruno pudo descansar. No hubo abrazo. Hubo una corriente de lodo que se coló en la madriguera y los inmovilizó a los dos. Un final agrio, como tantos en la vida.

Antes de que hagamos una campaña contra las madrigueras, recordemos que sin ellas y sin ese comportamiento fosorial que varios de nuestros ancestros desarrollaron, quizá no estaríamos aquí. La estrategia de ir bajo tierra cuando el mundo en la superficie se vuelve inhabitable fue decisiva para nuestra permanencia y se conservó en el repertorio evolutivo de muchas líneas que llegaron hasta el presente.

Gracias a seres como Trino (pequeños, resilientes y adaptables), los mamíferos lograron perdurar y diversificarse en el Mesozoico (aunque no se les dé el protagonismo mediático que acapara el *T. rex*) y más allá de él.

LECCIONES DE UN ANTIQUÍSIMO PLANETA

La Tierra no se mantuvo eternamente abrasadora. La historia tiene el descaro

de volverse irónica, ya que fue precisamente la actividad volcánica (la misma que desató todo este enrevesado desastre) la que, junto con las condiciones de efecto invernadero que produjo, intensificó la circulación monzónica.

Ese ciclo atmosférico de gran escala trajo consigo vientos húmedos y lluvias abundantes que rompieron la nada amigable aridez que predominaba en el Triásico. La vida, que hasta entonces había persistido apretada en los márgenes, comenzó a expandirse de nuevo y a diversificarse una vez más.

Porque vivimos tiempos oscuros, de negacionismo climático, conviene enfatizar que el hecho de que nuestro planeta haya sido, a menudo, mucho más caluroso que ahora no significa que el calentamiento actual sea natural ni que resulte inocuo para los humanos y las demás formas de vida. Y ésta es, quizá, la lección más valiosa que el pasado triásico nos deja: entender cómo actúa un clima desregulado, qué destruye primero, qué resiste, cuántos años tarda en volverse habitable lo que fue invivible y si acaso queda alguien, al otro lado de ese intervalo, para contarlo. $\mathcal{M}$