

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ESPAÑA

**LOS FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS EN EL ESTUDIO
DE FENÓMENOS GLOBALES: DEL CAMBIO
CLIMÁTICO A LA EXPLORACIÓN DE UN
CONTINENTE SUMERGIDO**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICA DE NÚMERO POR LA

EXCMA. SRA. D^a. LAIA ALEGRET BADIOLA

Y CONTESTACIÓN DEL

EXCMO. SR. D. ANTONIO CENDRERO UCEDA

2023



MADRID

Domicilio de la Academia: Valverde, 22

www.rac.es

ISSN: 0214-9540

DEPÓSITO LEGAL: Z-304-2023

ISBN: 978-84-87125-80-5

*A mi madre,
que me enseñó a vivir*

Carmina Badiola Medel
(1948-2022)

Índice

Discurso de toma de posesión de Laia Alegret Badiola como Académica de Número	7
1. Agradecimientos	7
2. Introducción	11
3. Los foraminíferos: pequeños fósiles para abordar grandes preguntas	12
4. Breve recorrido histórico sobre el estudio de los foraminíferos	15
5. Consideraciones metodológicas y técnicas para el estudio de foraminíferos y el análisis de fenómenos globales	21
6. Aplicaciones de los foraminíferos bentónicos	28
6.1. Eventos globales, cambio climático y extinción	28
6.1.1. El evento de extinción del límite Cretácico/Paleógeno	29
6.1.2. Eventos hipertermales del Paleógeno	35
6.2. La exploración de Zelandia, el continente sumergido	39
7. Conclusiones	48
8. Referencias	50
Contestación del Excmo. Sr. D. Antonio Cendrero Uceda	59

1. Agradecimientos

Excmo. Sr. Presidente de la Academia,

Excmos. miembros de la Academia,

Familiares, compañeros y amigos, Sras. y Sres.

Son muchas las personas a las que quiero expresar mi gratitud, y comenzaré por aquellas que han hecho posible mi entrada en esta Real Academia. D. José Luis Sanz-García, y D^a Ana María Crespo, Secretaria General de la Academia, han sido un constante apoyo para mi candidatura desde hace años, primero como Académica Correspondiente y después como Numeraria. Desde que en mi infancia soñaba con ser paleontóloga, ya leía con interés las noticias que publicaban los periódicos sobre la investigación de D. José Luis Sanz-García. El que años después fuera mi primera persona de contacto con la Academia y promoviera mis candidaturas, es algo que supera con creces cualquiera de mis expectativas, y por lo que siempre le estaré agradecida.

Es para mí un honor que sea el discurso de D. Antonio Cendrero el que conteste al mío. Estoy en deuda con él, y con los académicos D. Juan Rojo y D^a. Caridad Zazo, por presentar mi propuesta como Académica Numeraria y valorar con generosidad mis méritos. Agradezco también a los académicos de la Sección de Ciencias Naturales, y al pleno de la Academia, el otorgarme con su voto el privilegio de poder estar hoy aquí. La versión escrita de este discurso mejoró notablemente gracias a la revisión realizada por D. Antonio Cendrero, D. José Luis Sanz-García y D. José Alegret Querol.

No concibo pronunciar este discurso de ingreso sin mencionar a mi familia. Siempre he estado enormemente agradecida a mis padres por la educación que me regalaron, y por los valores que nos inculcaron tanto a mí como a mi hermana Nuria, a quien todos hemos

considerado siempre la más inteligente y sensata de la familia. A David Trallero, mi marido y compañero de vida al que siempre he admirado, tengo que agradecerle su apoyo incondicional y su paciencia, no sólo durante mis largas ausencias por trabajo, sino sobre todo cuando estoy en casa.

Son de obligada referencia aquí mis “padres científicos”, D^a. Ellen Thomas y D. Eustoquio Molina Martínez. Su profesionalidad y calidad humana han guiado mi carrera, y me han inspirado para ser cada día un poco mejor como científica y como persona. Además, quiero reconocer aquí la labor de cientos de investigadores con los que he colaborado a lo largo de mi carrera. Sin ellos, muy probablemente no habría tenido la oportunidad de redactar este discurso de ingreso.

Permitirán que haga más unas palabras que pronunció una prima de mi abuela materna cuando leyó su discurso de toma posesión del sillón “K” de la Real Academia Española en 1998. Aquella pariente lejana era Ana María Matute, y confesó en su discurso que “Ni en mis más locos sueños juveniles pude imaginar que un día me hallaría aquí, ante ustedes y en ocasión tan solemne. De hecho, de haber sabido que un día (mi trabajo) me llevaría a pronunciar un discurso tan difícil..., jamás me habría atrevido a escribir una sola línea. Pero por fortuna no lo sabía, y así puedo alegrarme de dos cosas: de haber escrito (mis trabajos) y de estar aquí, ahora, leyendo estas palabras ante los miembros de una institución mítica para mí.” Al igual que Ana María Matute, me siento honrada, halagada, y algo asustada porque soy consciente de la responsabilidad que esta distinción conlleva. Como siempre he hecho a lo largo de mi carrera, intentaré suplir cualquier falta de cualificación con mucho trabajo, esperando que mi colaboración con la Academia contribuya al progreso de la ciencia, a su difusión y su valoración social.

Tendré el honor de ocupar la medalla número 33 de esta Academia, que desde 1847 ha tenido siete ilustres predecesores. En el siglo xx, D. Eduardo Hernández-Pacheco, D. Antonio Almela Samper y, por último, D. Adriano García-Loygorri, del que destacaría sus

contribuciones sobre los recursos del carbón, su defensa de la geología aplicada y su visión de la contribución de la geología a la preservación del medio ambiente, así como su carácter de impulsor de una iniciativa tan importante para la geología española como fue el Programa MAGNA (Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000). Me resulta imprescindible nombrar aquí a D. Lucas Mallada y Pueyo, paisano mío y académico de esta casa, que también contribuyó al proyecto del Mapa Geológico en el siglo XIX. Nuestra ciudad natal, Huesca, sigue rindiendo homenaje a día de hoy a este ingeniero, geólogo y paleontólogo que, por cierto, da nombre a la revista en la que publiqué mi primer artículo científico.

Concluiré el apartado de agradecimientos recordando a tres académicos: D. Bermudo Meléndez y D. Emiliano Aguirre, que impulsaron el desarrollo de la Paleontología en España, y D. Juan Antonio Vera, que hizo lo propio con la Estratigrafía y la Sedimentología, y quien tuvo a bien formar parte del tribunal de mi tesis doctoral en el año 2002.

Situarme la última de esta fila formada por tan ilustres académicos es un honor que conlleva una gran responsabilidad. Intentaré seguir su ejemplo, y pondré todo mi esfuerzo en trabajar con mis compañeros de la Academia por el progreso de la Ciencia.

2. Introducción

No llegué a conocer a D. Adriano García-Loygorri, mi predecesor en la medalla número 33, pero he leído que vivió volcado en su profesión y que su mayor incentivo era ser útil para el conjunto de la sociedad. Eso es algo que tenemos en común. Como trataré de ilustrar a continuación en mi discurso, también nos une nuestra investigación, que desde perspectivas muy diferentes ha abordado temáticas relacionadas con los recursos naturales, los riesgos geológicos, y la contribución de la geología a la preservación del medio ambiente. En mi caso, el estudio de algo tan pequeño como fósiles microscópicos me ha permitido abordar grandes preguntas y fenómenos de naturaleza global, que incluyen desde las consecuencias de impactos meteoríticos, del vulcanismo o del cambio climático, hasta la exploración de un continente sumergido. Para ello, a lo largo de mi carrera me he centrado en el estudio de los foraminíferos bentónicos. Mi discurso pretende ilustrar qué son y exponer sus múltiples aplicaciones.

Realizaré un breve recorrido histórico sobre los estudios de foraminíferos bentónicos, que, lejos de ser riguroso, está sesgado por mis experiencias personales y por mi especialización. No persigo por tanto recopilar toda la información disponible sobre los avances históricos en el estudio de este grupo, sino resaltar algunos hitos que considero importantes, y reconocer la labor de muchos especialistas que han contribuido a que hoy en día los foraminíferos sean el grupo de microfósiles que más atención reciben, por sus múltiples aplicaciones. Destacaré, mediante casos concretos, su uso en el análisis de fenómenos a gran escala a través de la integración en estudios multidisciplinarios. Porque en ciencia, como en todo, la unión hace la fuerza, y el trabajo en el seno de equipos multidisciplinarios permite abordar problemas que no serían alcanzables mediante una aproximación individual.

Los ejemplos seleccionados incluyen problemáticas tan diversas pero de alcance tan global como los efectos del impacto de un asteroide hace 66 millones de años y la consecuente extinción en masa, diversos eventos de calentamiento global del pasado que pueden emplearse como análogos del actual cambio climático, o la exploración de un continente sumergido y apenas conocido, Zelandia.

Confío, a través de esta exposición, contribuir a que se valore la labor de tantos hombres y mujeres que durante siglos han dedicado gran parte de sus vidas a estudiar con microscopios los caparazones fosilizados de foraminíferos, y a desarrollar sus múltiples aplicaciones.

3. Los foraminíferos: pequeños fósiles para abordar grandes preguntas

Los fósiles son evidencias de la vida del pasado, y su estudio a través de la Paleontología permite analizar el origen y evolución de los organismos, los ambientes en los que vivieron y las interacciones entre ellos. La Paleontología no se limita a estudiar el pasado como algo muerto, sino que contribuye a comprender la vida y los ecosistemas actuales, poniendo en contexto incluso a nuestra propia especie. Además, la Paleontología se proyecta hacia el futuro y es fundamental para conocer la respuesta de nuestro planeta a eventos globales, incluido el actual cambio climático.

Una de sus ramas, la Micropaleontología, se encarga del estudio de los microfósiles, entendidos como todos aquellos restos de organismos que se encuentran en las preparaciones micropaleontológicas: lámina delgada, frotis, levigado, etc. La Micropaleontología se rige por los mismos principios científicos que el resto de ramas de la Paleontología (Brönnimann, 1965) y se diferencia de ellas principalmente por razones de índole técnica y práctica, empleando técnicas específicas de

muestreo, preparación y observación con el microscopio (Molina, 2017), si bien la separación entre macro y microfósiles es a veces arbitraria. Se suelen denominar microfósiles a los de tamaño inferior a 1 mm, aunque en las preparaciones micropaleontológicas es común encontrar fragmentos de organismos metazoos de mayor tamaño cuyo estudio es generalmente abordado por otras disciplinas, como la Paleobotánica, Paleontología de invertebrados o Paleontología de vertebrados.

Los microfósiles más típicos son los de organismos unicelulares procariotas y protistas, y abarcan una multitud de grupos desde las bacterias a organismos heterótrofos como los foraminíferos o los radiolarios, o los principales productores primarios de los océanos actuales (cocolitofóridos, dinoflagelados, diatomeas), entre otros. En comparación con otros fósiles de mayor tamaño, los microfósiles presentan numerosas ventajas, debido a su pequeño tamaño, gran abundancia en el sedimento y amplia distribución. Estas características propiciaron el desarrollo de la Micropaleontología aplicada, que emplea los microfósiles para resolver problemas geológicos y paleobiológicos a través de dataciones de las rocas (bioestratigrafía) e inferencias paleoecológicas, paleoambientales y evolutivas.

Mi discurso pretende ilustrar las múltiples aplicaciones del que probablemente es el grupo estrella en Micropaleontología: el de los foraminíferos. Los foraminíferos son un filum de protozoos ameboides que surgió hace unos 600 millones de años. La mayoría de estos protistas protegen su única célula mediante una concha que forman segregando carbonato cálcico, o aglutinando partículas del fondo marino con un cemento orgánico. La concha puede estar formada por una única cámara, o por varias que se conectan entre sí a través de un orificio interno llamado foramen, y que da nombre al grupo. A través de pequeñas perforaciones de la concha, extienden sus pseudópodos reticulados para desplazarse, alimentarse, y relacionarse con el medio (Fig. 1). En la actualidad se contabilizan unas 9000 especies vivientes y más de 40.000 especies fósiles, caracterizadas por una gran

variabilidad de formas y de ornamentación de sus conchas. Al morir, sus conchas se acumulan en el sedimento y fosilizan, dando lugar al grupo más estudiado en Micropaleontología por sus amplias aplicaciones en bioestratigrafía, reconstrucciones paleoambientales y paleoclimáticas, y en geoquímica isotópica. Los fósiles de foraminíferos presentan la ventaja de su gran ubicuidad, estando presentes en casi todas las rocas sedimentarias marinas.

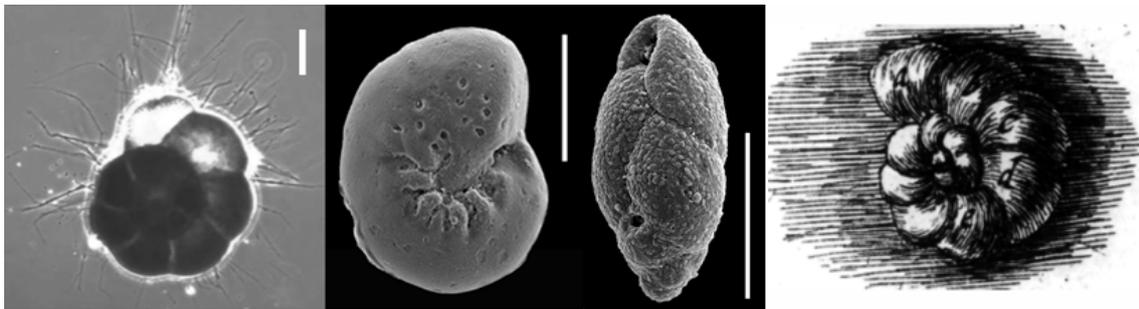


Figura 1. Izquierda: Foraminífero bentónico actual (izquierda), se observan las distintas cámaras de la concha espiralada, y los pseudópodos extendidos hacia el exterior (*Ammonia tepida*. Fuente: J. P. Debenay). Centro: Foraminíferos bentónicos fósiles (*Stensoieina beccariiformis* y *Bulimina kugleri*, ambos de concha calcárea), de edad Paleoceno, hace 65 millones de años. Fuente: Alegret y Thomas, 2007. Las escalas equivalen a 100 micras. Derecha: Primera ilustración de un foraminífero por Hooke en 1665, que el autor atribuyó a un caracol acuático petrificado, y que después fue denominado *Ammonia beccarii* por Linneo (fuente: Cifelli y Richardson, 1990).

Desde el punto de vista de su hábitat, se diferencian dos grandes grupos de foraminíferos: los planctónicos, que flotan a distintas profundidades en la columna de agua, y los bentónicos, que viven en el fondo marino. A lo largo de mi carrera investigadora me he dedicado al estudio de los foraminíferos bentónicos, y con cierta admiración suelo recordar que son los protistas unicelulares que ocupan el mayor hábitat del planeta, los fondos marinos, desde los estuarios y zonas más someras (incluso aquellas bañadas por las mareas más altas) hasta las grandes profundidades batiales y abisales, desde el ecuador hasta los polos.

Los fondos oceánicos batiales y abisales se caracterizan por temperaturas medias de 1°C, oscuridad y escasez de alimento,

recibiendo generalmente sólo un 1% de la productividad primaria de la superficie. Se trata por tanto de un ambiente hostil, pero también muy estable, y los cambios que se observan en las asociaciones de foraminíferos bentónicos son indicativos de cambios globales (Alegret et al., 2012). Las tasas evolutivas (aparición y extinción) de los foraminíferos bentónicos profundos son lentas, con duraciones medias de las especies de unos 50 millones de años, en comparación con los foraminíferos planctónicos (11 millones de años) o los bentónicos de medios someros (5-6 millones) (Ramírez-Llodra et al., 2010). Por este motivo, y porque son unos excelentes indicadores de las condiciones ambientales en los fondos marinos (Murray, 2006), proporcionan el mejor registro fósil de organismos que habitaban los fondos oceánicos. Múltiples estudios geoquímicos en sus conchas han permitido reconstruir la historia paleoclimática del planeta, especialmente de los últimos 66 millones de años o Cenozoico (ej., Zachos et al., 2008; Westerhold et al., 2020), ya que la temperatura de los fondos oceánicos profundos generalmente refleja la temperatura superficial de altas latitudes. Así, los foraminíferos bentónicos profundos son indicativos del clima global del planeta (Huber y Thomas, 2008).

4. Breve recorrido histórico sobre el estudio de los foraminíferos

Debido al tamaño relativamente grande de algunos foraminíferos bentónicos que son observables a simple vista, concretamente aquellos que ocupan zonas poco profundas cercanas a la costa, como los *Nummulites*, estos fueron ya conocidos desde antiguo. Las primeras interpretaciones los atribuían a las lentejas petrificadas procedentes de los restos de comida de los obreros que construyeron las pirámides (Herodoto, siglo V a. C.). También fueron interpretados como monedas

petrificadas u otros objetos, si bien algunos naturalistas reconocieron su naturaleza orgánica (Molina, 2017).

La mayor parte de los foraminíferos tienen un tamaño inferior a las 400 micras, por lo que la invención del microscopio representó un avance fundamental para su estudio, y para el nacimiento de la Micropaleontología en general. Este nuevo instrumento le permitió a Hooke, en su obra *Micrographia* de 1665, describir e ilustrar un microforaminífero bentónico, afirmando que se trataba de un pequeño caracol acuático petrificado. Casi un siglo después, este ejemplar sería reconocido como un foraminífero bentónico por Linneo (Fig. 1).

Durante el siglo XVIII, Gualteri, Soldani, Beccari, Bianchi y Ledermüller documentaron sus observaciones y descripciones de foraminíferos, principalmente en arenas de playas. En el siglo XIX destaca Alcide d'Orbigny (1802-1857), quien acuñó el término «foraminíferos», describió miles de especies y puso de manifiesto su potencial valor bioestratigráfico (Molina, 2017). Aunque inicialmente los consideró como cefalópodos y fue criticado por sus ideas catastrofistas y sobre las creaciones sucesivas, hoy muchos le consideran como el principal fundador de la Micropaleontología. Los estudios de d'Orbigny se continuaron en Austria por Reuss, quien propuso en 1862 la primera clasificación moderna de los foraminíferos basada en los caracteres de la concha: existencia de perforaciones y naturaleza de la pared. En Inglaterra, entre 1863 y 1890, Brady publicó varios trabajos sobre foraminíferos actuales y fósiles y elaboró el informe sobre los foraminíferos dragados en la expedición *Challenger*, aunque sus ideas sobre la exagerada variabilidad de especies retrasaron el desarrollo de la aplicación estratigráfica (Molina, 2017). En 1873, Charles Darwin confesaba en una carta a W. B. Carpenter “*El caso de las tres especies que aparentemente seleccionan granos de arena de diferentes tamaños, es probablemente el hecho más maravilloso que he oído. Es increíble que tengan el poder mental para hacerlo, y cómo (...) consiguen este resultado sobrepasa todo entendimiento*” (Burkhardt, et al. 1985). Hoy en día se ha demostrado que algunos foraminíferos no

sólo aglutinan tamaños concretos de partículas para construir sus conchas, sino también determinados tipos de minerales, o incluso fragmentos mineralizados de especies concretas de otros microfósiles (Pearson et al., 2018).

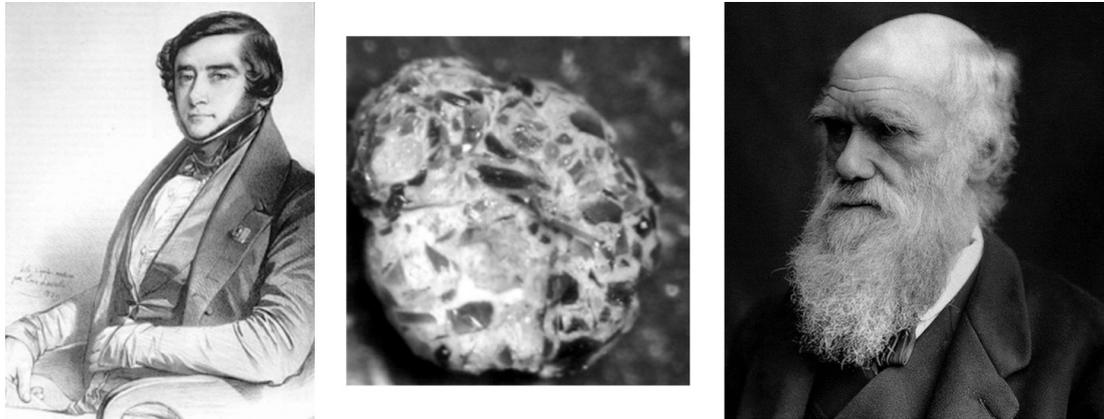


Figura 2. Izquierda: Alcide Charles d'Orbigny (1802-1857), considerado como el principal fundador de la Micropaleontología. Centro: uno de los foraminíferos bentónicos a los que se refería Charles Darwin en su carta a Carpenter, caracterizado por aglutinar un tamaño concreto de partículas para construir su concha. Derecha: Charles Darwin (1809-1882).

El número de micropaleontólogos dedicados al estudio de los foraminíferos creció muy rápidamente en el siglo xx. Y aunque la Micropaleontología nació en Europa, fue en América donde tuvo un desarrollo más espectacular debido a la aplicación de los foraminíferos a la datación y correlación de los sondeos petrolíferos. En Estados Unidos, Joseph A. Cushman (1881-1949) es considerado el padre de la Micropaleontología y pionero en la aplicación de los foraminíferos a la exploración petrolífera. Cushman creó una de las mejores bibliotecas y colecciones de foraminíferos que existen (alojada en la actualidad en el Museo Nacional de Historia Natural, de la *Smithsonian Institution*, en Washington D.C.), escribió una ingente cantidad de publicaciones, creó su propia revista sobre foraminíferos (*Contributions from the Cushman Laboratory for Foraminiferal Research*, hoy en día denominada *Journal of Foraminiferal Research*) y fundó un laboratorio en Sharon (Massachusetts) donde asesoró a compañías y colegas, y formó a numerosos aprendices (Fig. 3). Por citar únicamente a algunos:

Frances L. Parker, cuyos trabajos son parte de los cimientos de la paleoceanografía moderna, Ruth Todd, Pedro Joaquín Bermúdez, Mary Rathburn, Alfred R. Loeblich o Helen Tappan. Los trabajos de Cushman y la actividad de Udden, director del *Bureau of Economic Geology* de la Universidad de Texas, sirvieron para formar los primeros especialistas y convencer a las empresas y universidades del interés de los foraminíferos.



Figura 3. Joseph A. Cushman, Alice Cushman mecanografiando un manuscrito en el Laboratorio Cushman, Ruth Todd, y Frances Parker posando junto a su microscopio. Imágenes modificadas de *Cushman Foundation for Foraminiferal Research*.

La geóloga y paleontóloga estadounidense Esther (Richards) Applin (1895-1972) también es considerada como una de las pioneras en la aplicación bioestratigráfica de los foraminíferos a la industria del petróleo (Fig. 4). Su habilidad para reconocer zonas faunísticas y hacer correlaciones precisas basadas en foraminíferos, convenció a sus colegas escépticos, así como a los directivos de las empresas petroleras, de las numerosas ventajas de la Paleontología aplicada, contribuyendo además a fundar una nueva profesión. En la misma época (1891-1951), la estadounidense Helen Plummer trabajó como consultora para compañías petroleras, y de forma paralela describió numerosas especies de foraminíferos bentónicos en artículos científicos y construyó una extensa colección de muestras. En Australia, Irene Crespin (1896-1980) destacó por sus numerosos estudios regionales sobre foraminíferos bentónicos y por impulsar y mejorar los trabajos de correlación en el Indo-Pacífico.



Figura 4. Izquierda: Esther Applin realizando trabajo de campo. Centro superior: Esther Applin. Centro inferior: Helen Plummer. Derecha: Irene Crespin. Fuentes: *Smithsonian Institution, Paleontological Research Institution y Geological Society of Australia.*

Los pioneros de la micropaleontología española fueron Federico Gómez Lluca (1889-1960) y el mallorquín Guillermo Colom Casanovas (1900-1993), destacando este último (Fig. 5) por su extensa obra y por la importancia de sus trabajos sobre foraminíferos bentónicos y otros microfósiles (Molina, 2003), reconocidos a nivel internacional. Se considera a este investigador autodidacta, que fue Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España, como el español más significativo en el campo de la micropaleontología.

Sería un atrevimiento por mi parte tratar de sintetizar la extensa relación de especialistas en foraminíferos bentónicos desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la actualidad. Olvidaría incluir a muchos colegas que se merecen un puesto por sus excelentes estudios sobre foraminíferos bentónicos, y dicha relación sería inevitablemente incompleta. Perdonarán todos ellos que prefiera no incluir sus nombres, y que finalice este breve y sesgado repaso citando únicamente a dos personas a las que mi carrera ha estado ligada durante décadas.

La primera de ellas es mi director de tesis, el Dr. Eustoquio Molina (1950-2017), Catedrático de Paleontología de la Universidad de Zaragoza y miembro de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza. Él no era especialista en foraminíferos bentónicos, sino en planctónicos, pero dirigió varias tesis dedicadas a los pequeños bentónicos y me enseñó la metodología de estudio en Micropaleontología, me proporcionó todos los medios necesarios para iniciar mi investigación, me guió en el duro camino de la carrera académica en la Universidad, y fuimos colaboradores y amigos hasta su repentino fallecimiento en 2018. El Prof. Molina admiraba a Guillermo Colom, analizó su obra en detalle y en 2003 participó en un libro homenaje que se le dedicó (Molina, 2003).

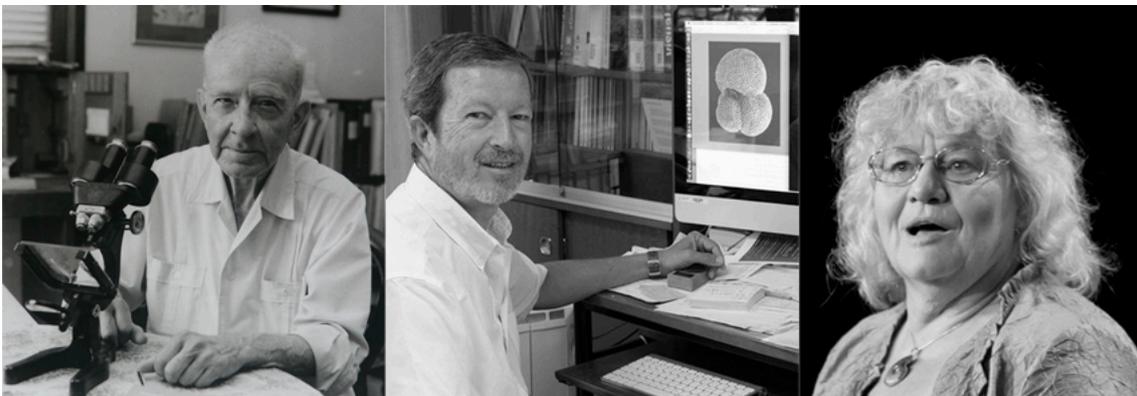


Figura 5. Los micropaleontólogos españoles Guillermo Colom y Eustoquio Molina, y la especialista en foraminíferos bentónicos Ellen Thomas.

La segunda persona que no puedo dejar de citar en este discurso es mi colaboradora desde hace más de dos décadas, la Dra. Ellen Thomas. Reconocida como una de las principales especialistas en foraminíferos bentónicos, su clasificación, historia evolutiva, y múltiples aplicaciones, la Dra. Thomas ejemplifica los esfuerzos para integrar los foraminíferos en estudios multidisciplinarios, en muchas ocasiones situados en la frontera del conocimiento, para reconstruir los climas de pasado. Sus estudios sobre los eventos de calentamiento registrados a lo largo del Cenozoico, sus efectos sobre los foraminíferos y sobre los ciclos geoquímicos globales, y su uso como

casos análogos del actual cambio climático, crearon una línea de estudio que hoy en día continúa a través del trabajo de múltiples equipos de investigación internacionales, ocupando frecuentemente los titulares de las mejores revistas científicas. La Dra. Thomas rompió moldes como mujer estudiante de doctorado en la Universidad de Utrecht en los años 70, y personifica el tesón y dedicación en ciencia, la excelencia en el conocimiento (no sólo de micropaleontología y sus aplicaciones sino también de muchos otros campos de la geología y de la biología), y es una científica altamente respetada y admirada por la comunidad científica internacional. Todo ello ha quedado reflejado en su soberbio currículum (Alegret et al., 2021a), en sus numerosas colaboraciones científicas, y en los prestigiosos premios y reconocimientos recibidos, siendo el más reciente el Premio Fronteras del Conocimiento 2023 de la Fundación BBVA, en la categoría de Cambio Climático.

5. Consideraciones metodológicas y técnicas para el estudio de foraminíferos y el análisis de fenómenos globales.

La Micropaleontología se rige por los mismos principios científicos que el resto de ramas de la Paleontología (Brönnimann, 1965). La Paleontología es una ciencia natural porque su método se basa en la observación e interpretación de los objetos, aunque no experimenta directamente con ellos, y es además una ciencia histórica por ocuparse de interpretar los documentos del pasado, reconstruir procesos y descubrir los factores que han influido en su curso (López Martínez y Truyols, 1994). Se trata de una ciencia situada a caballo entre la Biología y la Geología, entendiendo la primera como la ciencia que estudia la vida del presente, y la segunda como la ciencia que

estudia la Tierra en su sentido más amplio, especialmente desde el punto de vista genético y evolutivo. No obstante, las peculiaridades del registro fósil hacen que la Paleontología se encuentre claramente individualizada de ambas.

Para que un resto corporal o una señal de un organismo se consideren como *fósiles* es necesario que se haya producido un proceso físico-químico que le afecte, conocido como fosilización (López Martínez y Truyols, 1994). Desde un punto de vista metodológico, un fósil es una entidad de doble naturaleza: paleobiológica y tafonómica, producto de dos procesos independientes cuyas historias y naturaleza se pueden reconstruir gracias a los postulados emanados de las diferentes subdisciplinas de la Paleontología (Fernández López, 1989). La entidad paleobiológica es el resultado de procesos evolutivos y es estable en su concepción, es decir única. La entidad tafonómica es el resultado de procesos tafonómicos (aquellos que le suceden a un resto orgánico desde su producción hasta su hallazgo, incluidos los bioestratinómicos, anteriores a su enterramiento, y los fosildiagenéticos, posteriores al mismo), está inmersa en un sistema dinámico, por su procedencia tiene historia y por su naturaleza está sujeta a continuos cambios.

En definitiva, un fósil supone un fenómeno de transferencia de materia y/o información de la biosfera a la litosfera en el que confluyen historias independientes (biológicas, sedimentológicas y tafonómicas). Los fósiles y los lugares de donde son extraídos son por ello valiosos documentos científicos para descubrir el pasado de la Tierra, de la vida y de los seres humanos, pero al mismo tiempo constituyen útiles recursos naturales, culturales, educativos y turísticos, obligando así a obrar consecuentemente para garantizar su protección.

En el estudio de los microfósiles se emplean técnicas especiales de muestreo, preparación y observación con el microscopio (Molina, 2017). La utilidad práctica de los microfósiles emana de sus características: pequeño tamaño, abundancia en el registro fósil, alto

grado de conservación de sus ejemplares, sesgo tafonómico normalmente poco importante en muchos ambientes, variada procedencia paleobiológica y paleoambiental, presencia desde tiempos precámbricos y corta distribución estratigráfica de muchas de sus especies. Permiten que con muestras relativamente pequeñas se obtenga material adecuado para aplicar métodos de análisis rigurosos (cuantitativos y poblacionales, estadísticos, isotópicos, etc.), que proporcionan resultados muy relevantes.

Uno de los aspectos metodológicos más relevantes en Micropaleontología es la recolección de muestras. El análisis de fenómenos globales requiere el estudio de localidades de distribución global, y el muestreo de microfósiles puede realizarse en superficie (afloramientos rocosos) o bien a partir de los testigos procedentes de sondeos o pozos. En este último caso, los estudios paleontológicos se realizan casi exclusivamente a partir de microfósiles. Estos aspectos metodológicos justifican que el desarrollo de la Micropaleontología aplicada fuera de la mano, no sólo del perfeccionamiento de los microscopios, sino también de innovaciones tecnológicas para la recuperación de sondeos, frecuentemente asociados a la prospección petrolífera (Kaminski et al., 1993).

La perforación de sondeos bajo el fondo marino es fundamental para obtener sedimentos antiguos que permitan describir la historia de nuestro planeta. Las primeras expediciones oceanográficas en estudiar sistemáticamente los fondos oceánicos, como la expedición británica *Challenger* (1872-1876), no perforaron el subsuelo pero sí recuperaron y describieron miles de especies de microfósiles (Linklater, 1982). Para ello, la corbeta *HMS Challenger* (Fig. 6) fue dotada de laboratorios y una plataforma de dragado, se adaptó para medir la profundidad, y se equipó con microscopios y el material necesario para medir las propiedades de las aguas, recolectar especies marinas, y obtener sedimentos del fondo. Esta expedición logró trazar el primer mapa de los sedimentos oceánicos y documentó la gran diversidad de especies que habitan en medios profundos (Fig. 7).

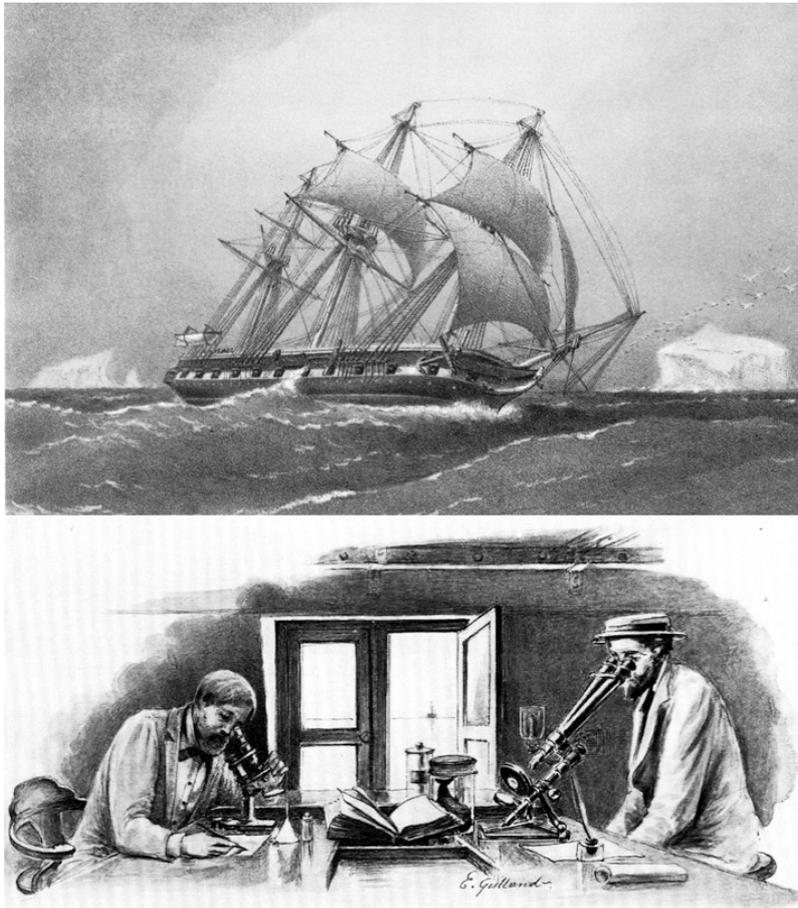


Figura 6. *HMS Challenger* (dibujo de W. F. Mitchell), y dos científicos trabajando con primitivos microscopios ópticos a bordo del *Challenger* (dibujo tomado de *The Report*, Buchanan et al. 1885-1895).

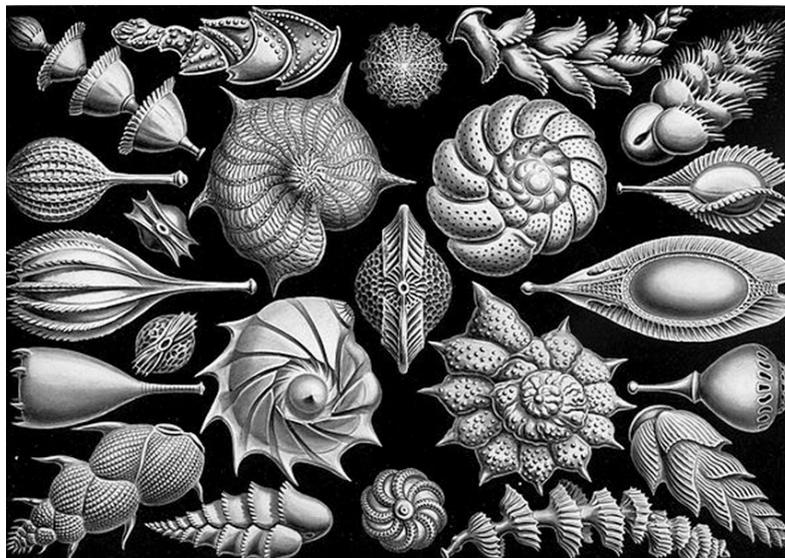


Figura 7. Ilustraciones realizadas por Ernst Haeckel de los foraminíferos recuperados durante la expedición del *HMS Challenger*.

La expedición *Albatross* (1947-1948) recolectó muestras del fondo oceánico y determinó su edad geológica, utilizando una nueva máquina de muestreo impulsada por pistones de pólvora (Wali y Olsson, 1993). Este avance tecnológico permitió recuperar del fondo marino sondeos más largos, de hasta 20 m de longitud (Fig. 8). Hasta entonces, los sondeos que se perforaban en el subsuelo marino eran de aproximadamente 2 metros, pues los tubos de muestreo generalmente llegaban al sedimento empujados por su propio peso tras caer por la columna de agua, limitando por tanto la fuerza máxima de perforación. La expedición supuso un hito en la obtención de sondeos largos para reconstruir la historia de la Tierra y la vida, y a partir de entonces comenzó una intensa carrera de investigación de los fondos oceánicos por medio de distintos programas de perforación oceánica.

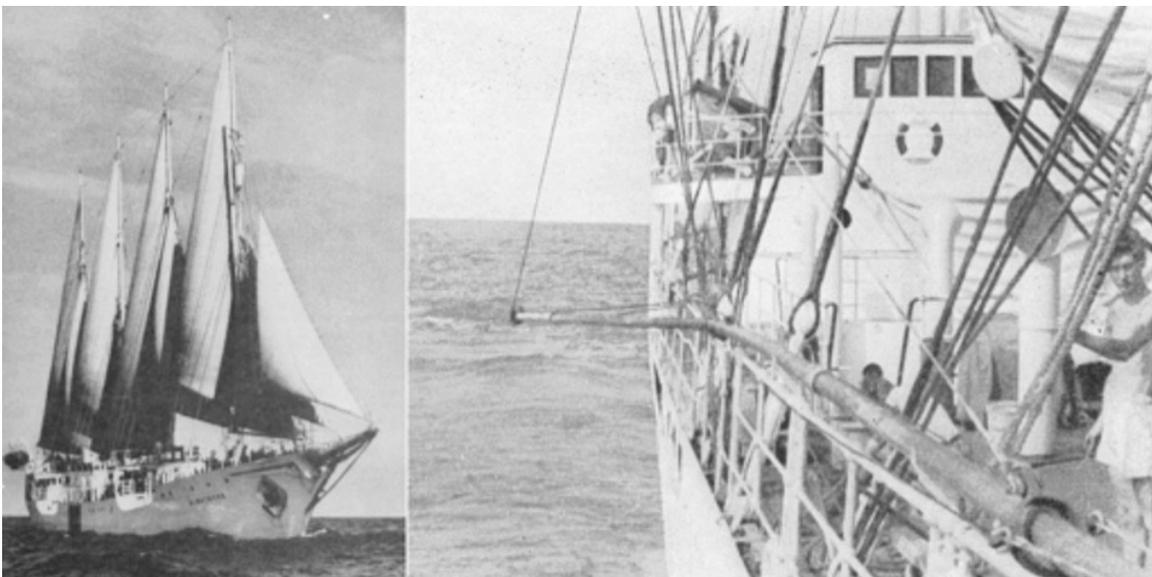


Figura 8. El buque sueco *Albatross*, y extracción de un sondeo largo del fondo del mar (imágenes de dominio público, Wikimedia 3622541 y 4211358).

Estos programas se han sucedido ininterrumpidamente desde el *Deep Sea Drilling Project* (DSDP; 1968-1983) hasta el actual *International Ocean Discovery Program* (IODP), todos ellos fruto de la colaboración internacional. La sucesiva incorporación de innovaciones tecnológicas en los sistemas de perforación y en los buques empleados por estos programas, desde el *Glomar Challenger* (buque insignia del

DSDP) hasta el *Joides Resolution* (Fig. 9) y plataformas para misiones específicas, han permitido obtener sondeos cada vez más completos, continuos, mejor conservados y menos afectados por procesos de mezcla, en lugares cada vez más remotos (ej., sondeos del Ártico) y profundos, o en zonas muy someras, ofreciendo a la comunidad científica un archivo de sedimentos y fósiles que hace menos de un siglo era impensable.



Figura 9. Los buques de perforación submarina *Glomar Challenger* (izquierda) y *Joides Resolution* (derecha). Fuente: *JOIDES Resolution Science Operator, Texas A&M University*.

La incorporación en estas últimas décadas de los avances de otras disciplinas científicas y de nuevas tecnologías está siendo sustancial para el estudio de los foraminíferos bentónicos, y para la Paleontología en general. Ejemplos de estas influencias son el empleo de técnicas estadísticas (ej., Hammer y Harper, 2006), el microscopio electrónico de barrido, la tomografía computerizada, el Sincrotrón, o las nuevas técnicas de reconstrucción de fósiles en tres dimensiones y de procesado de imagen. Estas técnicas no invasivas han supuesto toda una revolución en el estudio de los foraminíferos, facilitando el acceso a estructuras y morfologías internas, y con una resolución sin precedentes. Además, han contribuido a la difusión de la información para la investigación, enseñanza y divulgación, por ejemplo a través de la digitalización de colecciones en museos y construcción o impresión de réplicas en tres dimensiones (Fig. 10).



Figura 10. La Dra. Ellen Thomas (Universidad de Yale y Universidad Wesleyan, Estados Unidos), pionera en la digitalización 3D de colecciones de foraminíferos, mostrando dos impresiones.

Los recientes avances en Paleontología isotópica, con sus múltiples aplicaciones en paleoclimatología y paleoecología, y los análisis de geoquímica orgánica enfocados al estudio del registro fósil, han abierto un amplio abanico de posibilidades (Gaines et al., 2009). Entre otras muchas aplicaciones, han arrojado resultados novedosos sobre la historia evolutiva de muchos grupos, y han contribuido a reconstruir los ambientes del pasado, por ejemplo mediante el desarrollo de índices de paleotemperatura. La creciente precisión analítica de los equipos permite hoy en día identificar biomarcadores orgánicos incluso en el cemento orgánico que aglutina los granos que componen los caparazones de foraminíferos bentónicos aglutinados de 55 millones de años de edad, y cuyos tamaños apenas superan las 100 micras (Arreguín-Rodríguez et al., 2014). La utilización de estas y otras técnicas ha abierto un sinfín de posibilidades para el estudio de los materiales paleontológicos, y ha propiciado una mayor interdisciplinaridad en la investigación micropaleontológica, dando un notable impulso al estudio de fenómenos globales y hallando respuestas a múltiples interrogantes en Paleontología.

6. Aplicaciones de los foraminíferos bentónicos

6.1. Eventos globales, cambio climático y extinción

La evolución de la vida en nuestro planeta ha estado irremediablemente salpicada por numerosas extinciones. Estos eventos de extinción se alternan con largos periodos en que las especies se renuevan de forma más o menos lenta, aleatoria y continua, a lo largo de los tiempos geológicos, en un proceso denominado extinción de fondo. En el registro paleontológico se observan además momentos en los que la tasa de extinción se aceleró, desapareciendo un porcentaje significativo de especies en periodos de tiempo relativamente breves. Estos momentos corresponden a los denominados eventos de extinción.

Cinco grandes eventos de extinción en masa destacan sobre los numerosos eventos de extinción menores; son los de finales del Ordovícico, Devónico, Pérmico, Triásico y Cretácico. A estas cinco extinciones mayores del Fanerozoico (Raup y Sepkoski, 1982), apodadas en inglés como "*The big five*" y caracterizadas por la extinción de más del 75% de las especies, hay que añadir la sexta gran extinción en masa que estamos viviendo en la actualidad.

Los grandes eventos de extinción en masa pueden seguir un modelo gradual o catastrófico, en función de las causas desencadenantes de la extinción, que pueden ser muy variadas. Las causas principales de la extinción de fondo son la competencia y el endemismo, y las de los eventos de extinción en masa son mayormente extraterrestres (ej., impactos de cometas o grandes meteoritos, radiación solar y cósmica) y geológicas (ej., tectónica de placas y vulcanismo, efecto invernadero y calentamiento global, glaciaciones, cambios del nivel del mar, anoxia marina, ruptura de la productividad marina) (Molina, 2015). Una causa desencadenante suele derivar en otras que alteran las condiciones medioambientales. La sexta gran extinción en masa que estamos presenciando en la actualidad se

relaciona excepcionalmente con una causa biológica, concretamente con el dominio de una sola especie (*Homo sapiens*) y sus actividades (IPCC, 2022).

El estudio de eventos de extinción persigue establecer la relación de causa y efecto, y esto es únicamente posible cuando existe coincidencia y correlación posible con un patrón de extinción. Para ello se requieren estudios integrados de los ecosistemas, dataciones muy precisas, y muestreos de alta resolución que permitan comprobar si las extinciones son un fenómeno real o una consecuencia del registro fósil incompleto (Alegret et al., 2022). Mi discurso pretende ilustrar cómo el estudio de los foraminíferos bentónicos ha contribuido de forma muy significativa al estudio de eventos de extinción y de fenómenos globales como el cambio climático. Para ello, mostraré como ejemplo el evento de extinción en masa de finales del Cretácico, y los eventos de calentamiento global o hipertermales del Paleógeno.

6.1.1. El evento de extinción del límite Cretácico/Paleógeno

Entre las cinco mayores extinciones registradas en el Fanerozoico (Raup y Sepkoski, 1982), la del límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg), aunque no es la de mayor magnitud, es probablemente la mejor conocida y más profundamente estudiada. Al igual que otros eventos a gran escala, la búsqueda de la causa desencadenante de las extinciones fue un largo proceso, y algunos de los descubrimientos llegaron por casualidad.

En la década de 1970, Walter Álvarez y William Lowrie estaban realizando estudios sobre la polaridad magnética terrestre en las calizas del Cretácico Superior y del Cenozoico que afloran cerca de la localidad italiana de Gubbio, con el objetivo de proporcionar un marco temporal para las anomalías magnéticas que se extienden por el fondo marino. Para ello colaboraron con micropaleontólogos, entre los que se encontraban Isabella Premoli Silva, Hanspeter Luterbacher y Simonetta Monechi, quienes proporcionaron la bioestratigrafía basada

en foraminíferos planctónicos y nanofósiles calcáreos. En el tránsito entre el Cretácico y el Paleógeno identificaron una capa arcillosa, y para calcular cuánto tiempo representaba, analizaron en la Universidad de Berkeley su contenido en iridio, en colaboración con Luis Álvarez, Frank Asaro y Helen Michel. La corteza terrestre está empobrecida en este elemento siderófilo en comparación con el manto y el núcleo, y el Ir que se encuentra en los sedimentos de la corteza proviene fundamentalmente de la lluvia de micrometeoritos del espacio. A partir del contenido en Ir hallado en la arcilla, y suponiendo que esta lluvia es constante, el equipo de Álvarez planificó calcular las tasas de sedimentación. Por casualidad, descubrieron que la cantidad de Ir en la arcilla del límite K/Pg era mucho más elevada que la que cabría esperar de la lluvia normal de micrometeoritos, y propusieron que estaba relacionada con el impacto de un gran asteroide de unos 10 km de diámetro (Álvarez et al., 1980). Asimismo, postularon que los efectos del impacto desencadenaron la gran extinción del límite K/Pg.

Ese mismo año, Smit y Hertogen (1980) llegaron a conclusiones similares basadas en su estudio del corte español de Caravaca.

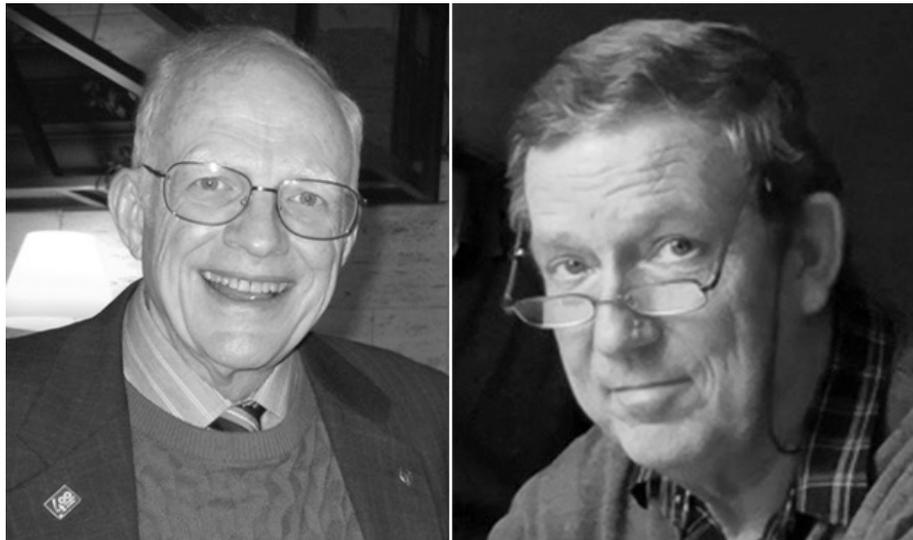


Figura 11. Los Dres. Walter Álvarez (Universidad de California, Berkeley) y Jan Smit (*Vrije Universiteit Amsterdam*) comparten la autoría de la hipótesis “impactista” del límite Cretácico/Paleógeno.

La hipótesis del impacto de un cuerpo extraterrestre como causante de las extinciones no era nueva (De Laubenfels, 1956), pero la anomalía de Ir fue la primera evidencia física que apoyó dicha hipótesis (Alegret et al., 2022). Le siguieron la identificación de la anomalía de Ir a nivel global, otras anomalías geoquímicas, el hallazgo de partículas expulsadas por el impacto, minerales de choque, espinelas ricas en níquel y microesférulas, y la localización del cráter de impacto en la península de Yucatán y los depósitos asociados en el área del Golfo de México y Caribe (Schulte et al., 2010). El impacto, y sus consecuencias sobre el medioambiente y sobre la vida, dejaron además una señal geoquímica en los registros marinos que se identifica a escala global: la desaparición del gradiente que existe entre los isótopos del ^{13}C de la superficie y el fondo oceánicos (Fig. 12).

La causa desencadenante de las extinciones fue objeto de debate durante décadas, principalmente debido a que a finales del Cretácico y comienzos del Paleógeno se registró una intensa actividad volcánica en el área del Decán, en la India. No obstante, no se han llegado a registrar extinciones intercaladas con las coladas basálticas del Decán, y los registros de paleotemperatura y estimaciones de la liberación de gases asociada a la principal fase de actividad volcánica indican que ésta comenzó y acabó significativamente antes del impacto de Yucatán y de las extinciones, siendo posible una segunda fase de desgasificación posterior a las extinciones. Únicamente el impacto coincide temporalmente con la extinción en masa, y con los cambios globales en la temperatura y en el ciclo de carbono (Hull et al., 2020).

Desde la propuesta de la hipótesis “impactista” en 1980, la comunidad científica ha analizado el evento de extinción de finales del Cretácico con una intensidad, nivel de detalle y resolución sin precedentes, concluyendo de forma casi unánime que el impacto del asteroide en la Península de Yucatán, hace 66 millones de años, fue la causa desencadenante. En medios terrestres, se extinguieron grupos como los dinosaurios no avianos, los reptiles voladores, o el 30-80% de las plantas, y en medios marinos se estima que se extinguieron más del

75% de las especies, incluidos grupos enteros como los rudistas, los ammonites o los mosasaurios, y más del 90% de las especies de foraminíferos planctónicos y cocolitofóridos (Alegret et al., 2022). Los mecanismos a través de los cuales los efectos ambientales del impacto provocaron las extinciones todavía son objeto de un interesante debate, e incluyen el oscurecimiento del planeta por la emisión de polvo, cenizas y gases volátiles a la atmósfera, un enfriamiento o “invierno de impacto” asociado, la destrucción de la capa de ozono, un golpe de calor e incendios a nivel global inmediatamente después del impacto y lluvia ácida (Hull et al., 2020).

Tradicionalmente, las extinciones en los océanos se atribuyeron al colapso de la productividad primaria (o al cese del transporte de la materia orgánica producida hacia los fondos oceánicos) durante decenas a cientos de miles de años tras el impacto (Hsü y MacKenzie, 1985; d’Hondt *et al.*, 1998), como resultado del oscurecimiento global y de la extinción del zooplancton, que contribuye a la transferencia de la materia orgánica al fondo. Esta hipótesis fue propuesta originalmente por geoquímicos y paleoceanógrafos para explicar la desaparición del gradiente entre los isótopos del ^{13}C de la superficie y el fondo oceánicos. Los estudios paleontológicos detallados sobre grupos que no sufrieron extinciones eran escasos, y en la literatura científica se daba prioridad al análisis exhaustivo de los patrones de extinción. Sin embargo, fueron los estudios de grupos que a priori eran poco interesantes porque presentaban continuidad a través del límite K/Pg, como los foraminíferos bentónicos, los que permitieron demostrar que la productividad primaria marina no sufrió un colapso global y duradero tras el impacto del asteroide (Alegret y Thomas, 2009; Alegret et al., 2012), rebatiendo así la imagen de un océano agonizante que se había aceptado durante décadas. En efecto, hasta entonces las investigaciones parecían haber pasado por alto el hecho de que un colapso prolongado en el aporte de alimento al fondo habría provocado extinciones entre los foraminíferos bentónicos, cuando los estudios previos habían documentado la ausencia de extinciones

significativas en este grupo. A raíz de este punto de inflexión, se sucedieron una serie de estudios geoquímicos (ej., biomarcadores orgánicos, Sepúlveda et al., 2009; bario biogénico, Hull y Norris, 2011) que corroboraron la ausencia de un colapso prolongado en la productividad primaria tras el impacto, y se puso de manifiesto el marcado efecto vital que imprimieron las especies pre y post-extinción a la señal isotópica de la superficie de los océanos (Alegret et al., 2012; Henehan et al., 2019). El descenso en los isótopos de carbono de la superficie no era por tanto un fiel reflejo de la productividad marina, porque los microfósiles en los que se obtuvieron las medidas post-extinción eran especies oportunistas caracterizadas por valores bajos del $\delta^{13}\text{C}$ (Alegret et al., 2012) (Fig. 12).

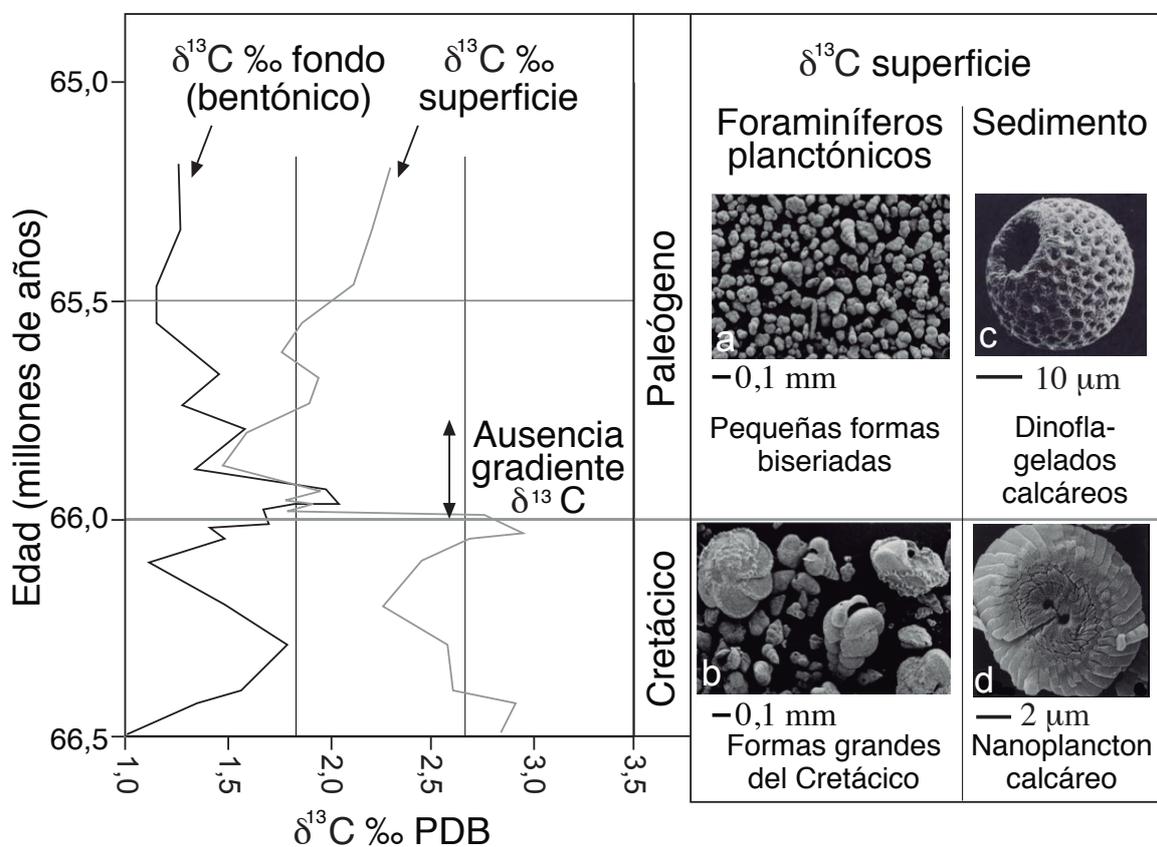


Figura 12: Representación idealizada del colapso del gradiente del $\delta^{13}\text{C}$ entre la superficie y el fondo oceánicos en el límite Cretácico/Paleógeno. Se muestra la principal fuente de la señal isotópica en superficie: nanoplancton calcáreo y grandes foraminíferos planctónicos durante el Cretácico, y dinoflagelados calcáreos y pequeños foraminíferos planctónicos bi-triseriados durante el Paleógeno inicial. Modificada de Alegret (2014).

El límite Cretácico/Paleógeno es por tanto un ejemplo de cómo una hipótesis planteada originalmente desde el campo de la geoquímica para analizar el ciclo del carbono, y adaptada posteriormente a interpretaciones paleontológicas, pudo ser falsada gracias al estudio de grupos que, aparentemente, presentaban poco interés para el estudio de la quinta gran extinción en masa. De hecho, el estudio de los foraminíferos bentónicos incluso contribuyó a responder la pregunta que quedaba pendiente: si no hubo un colapso prolongado de la productividad primaria marina durante decenas a cientos de miles de años tras el impacto del asteroide, ¿cuál fue la causa de las extinciones masivas en los océanos?. Así retomó fuerza la antigua hipótesis de la acidificación de los océanos como principal causa de la extinción en masa del plancton calcáreo, de los ammonites (de caparazón aragonítico y que habitaban en aguas superficiales) y de los grandes reptiles marinos como los mosasaurios (cuya alimentación pudo estar basada principalmente en los anteriores) (Alegret et al., 2012). El impacto en Yucatán, sobre anhidritas ricas en sulfatos (Ohno *et al.*, 2014), y la fricción del asteroide en la atmósfera, generarían vapores que provocaron lluvia ácida. La acidificación tendría lugar en las aguas superficiales de los océanos y duraría muy poco en términos geológicos (de meses a años). La acidez sería rápidamente neutralizada en la columna de agua y no afectaría a organismos bentónicos de caparazones calcáreos (como los foraminíferos bentónicos) ni a los nautiloideos, que habitaban a mayor profundidad que sus parientes próximos, los ammonites, ni a los organismos planctónicos de caparazones silíceos u orgánicos.

Al retomarse la hipótesis de la acidificación oceánica, se intensificaron los estudios en búsqueda de evidencias empíricas que la apoyaran. Los resultados no se demoraron, y en 2019 se publicó la primera medida del pH de las aguas del Cretácico-Paleógeno inferida a partir de análisis de boro en conchas de foraminíferos procedentes de la mina de Geulhemmerberg, en los Países Bajos. Los análisis geoquímicos mostraron un descenso en el pH de las aguas superficiales

de 0,25 unidades, tratándose de la primera medida empírica sobre los mecanismos que desencadenaron las extinciones (Henehan et al., 2019).

6.1.2. Eventos hipertermales del Paleógeno

Los foraminíferos bentónicos proporcionan el registro más continuo de organismos que habitaban en medios profundos durante el Cenozoico, y por ese motivo sus conchas se emplean en análisis geoquímicos para reconstruir el ciclo del carbono y la temperatura del pasado (Fig. 13). Así, los isótopos del oxígeno en el carbonato de sus conchas indican que, una vez superada la crisis del límite K/Pg, a lo largo del Paleoceno se produjo una tendencia general de calentamiento del planeta, hasta que hace 56 millones de años, en el tránsito Paleoceno-Eoceno, se registra un máximo térmico durante el cual se alcanzaron las temperaturas más elevadas de todo el Cenozoico (Fig. 13). El Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM, por sus siglas en inglés), se ha asociado a la emisión de grandes cantidades de carbono ligero C^{12} al sistema océano-atmósfera (Dunkley Jones *et al.*, 2013), por ejemplo en forma de metano o dióxido de carbono. Como resultado se produjo un calentamiento global de todo el planeta, en todas las latitudes y profundidades, incluidos los fondos oceánicos, además de migraciones, extinciones, y profundos cambios en los ciclos del carbono e hidrológico.

El drástico descenso en los isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) durante el límite Paleoceno/Eoceno, tanto en carbonatos marinos como terrestres, sugiere una liberación de carbono ligero 4 a 8 veces mayor que las emisiones antropogénicas desde que comenzó la era industrial hasta la actualidad (Marland et al., 2005), y es comparable a las previsiones para finales del siglo XXI. Durante los doscientos mil años que duró el evento del PETM, el plancton oceánico evolucionó y los taxones termofílicos migraron a altas latitudes. En medios terrestres también se registra evolución y migración de especies a altas latitudes,

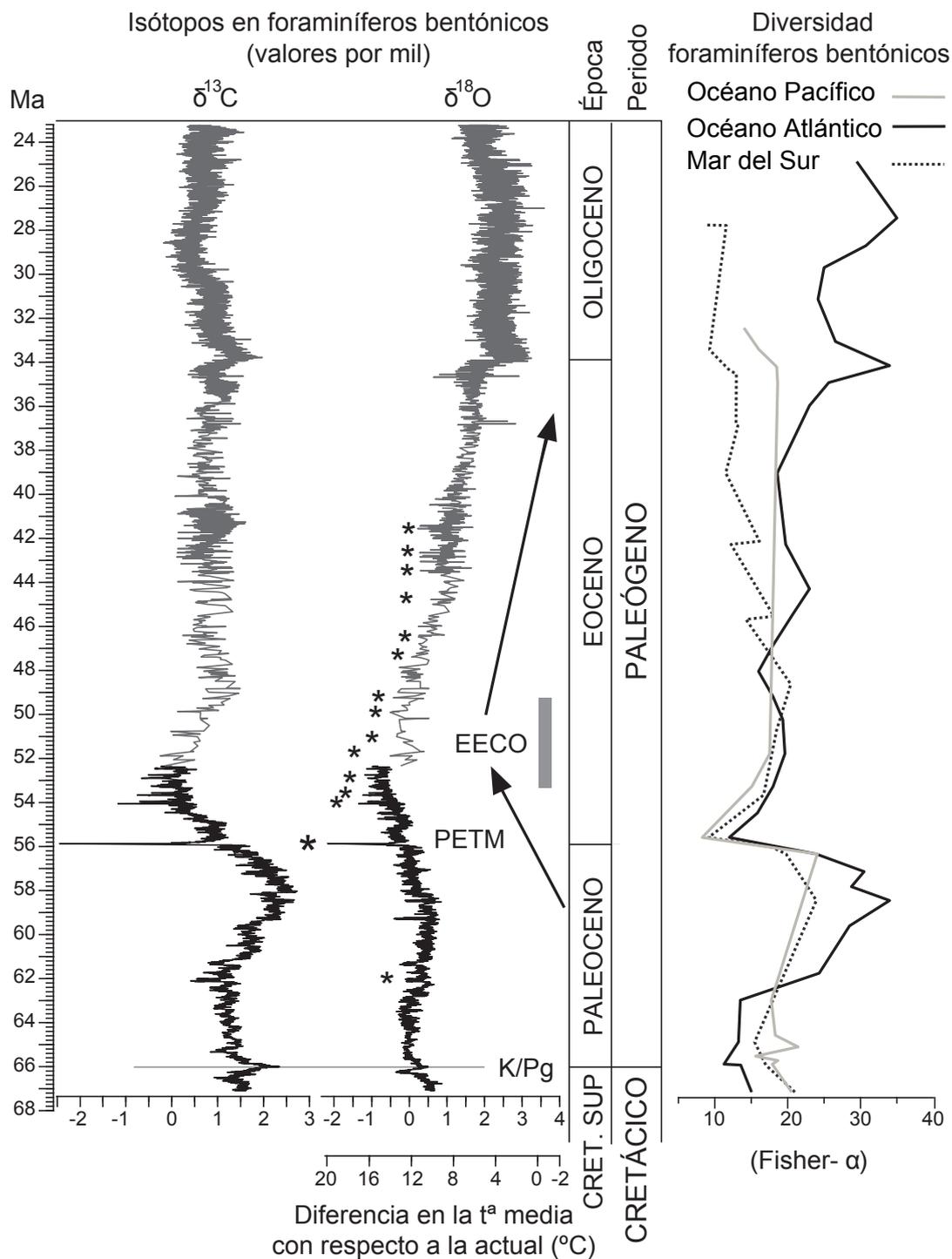


Figura 13: Variaciones en los isótopos estables de carbono y oxígeno medidos en foraminíferos bentónicos entre hace 23 y 67 millones de años (Ma). Los asteriscos señalan los rápidos eventos de calentamiento (hipertermales) que se superponen a los cambios graduales en la temperatura global (indicados con flechas: calentamiento en el Paleoceno-Eoceno, culminando en el Óptimo Climático del Eoceno Inicial, EECO; y enfriamiento hacia el Eoceno superior). Derecha: diversidad de los foraminíferos bentónicos en tres océanos, que muestra la caída más marcada en el límite Paleoceno/Eoceno, coincidiendo con la extinción de foraminíferos en medios profundos. Modificado de Alegret et al. (2021b).

habiéndose hallado flora y fauna característica de medios cálidos tropicales (ej., cocodrilos, palmeras, nenúfares) en el Ártico. Sin embargo, los foraminíferos bentónicos que habitaban en los fondos oceánicos profundos y que habían sobrevivido al impacto de finales del Cretácico, sufrieron la extinción del 35-50% de sus especies, siendo la extinción más importante sufrida por este grupo en los últimos 90 millones de años (ej., Thomas, 2007; Alegret et al., 2010). El evento de extinción tuvo lugar en un corto lapso de tiempo, y afectó en mayor medida a las especies de foraminíferos bentónicos que habitaban en medios profundos. Las extinciones globales son poco frecuentes en este tipo de ambientes, y los escasos ejemplos que existen suelen indicar ausencia de refugios donde protegerse de las condiciones desfavorables, incluso para los foraminíferos bentónicos, que se dispersan eficazmente en los fondos oceánicos (Alve y Goldstein, 2010).

Los mecanismos concretos que causaron la extinción siguen siendo objeto de debate, habiéndose postulado un descenso en la oxigenación de las aguas profundas, cambios en la productividad marina, o un aumento en la corrosividad de las aguas y disolución del carbonato en medios profundos, resultantes de la rápida adición de carbono ligero (C^{12}) al sistema océano-atmósfera (Hönisch et al., 2012). Se ha estimado que el evento de acidificación oceánica tuvo una duración de unos 20.000 años (Cui et al., 2011). Estos mecanismos pudieron contribuir a las extinciones de foraminíferos bentónicos en amplias regiones, aunque ninguno de ellos se ha registrado a nivel global. El aumento de la temperatura fue el único parámetro documentado en todas las latitudes, ambientes y profundidades.

El calentamiento de los fondos oceánicos pudo acelerar las tasas metabólicas de los foraminíferos bentónicos, que en la actualidad se duplican por cada aumento de $\sim 10^{\circ}C$ en la temperatura (Gillooly et al. 2001). Ello, unido al incremento en la remineralización de la materia orgánica en la columna de agua a mayores temperaturas (Ma et al. 2014), pudo generar un déficit de nutrientes en los fondos, provocando

las extinciones de los foraminíferos bentónicos (Alegret et al., 2009, 2010).

A lo largo del Paleoceno y del Eoceno se registran otros hipertermales o eventos de calentamiento, de menor magnitud que el PETM pero de características similares (Fig. 13). Todos ellos están marcados por excursiones negativas en los isótopos de oxígeno y carbono, que indican calentamiento y liberación de C^{12} al sistema océano-atmósfera. Estos eventos de calentamiento de distinta magnitud, duración y tasa de cambio se estudian como análogos del actual cambio climático.

Los hipertermales menores provocaron un descenso en la diversidad de las asociaciones de foraminíferos bentónicos y variaciones en la abundancia relativa de las especies, pero no causaron extinciones en este ni en otros grupos marinos. Al igual que durante el PETM, el calentamiento aceleraría las tasas metabólicas de los foraminíferos bentónicos e influiría también en la cantidad de materia orgánica que es transportada a los fondos oceánicos. No obstante, el calentamiento global debido a estos eventos hipertermales menores fue inferior al registrado durante el PETM, existiendo probablemente un valor crítico de calentamiento (alcanzado durante el PETM) a partir del cual habría extinciones entre los foraminíferos bentónicos. Ese valor crítico no se alcanzaría durante los hipertermales menores, por lo que no se registran extinciones en los fondos oceánicos (Alegret et al., 2021c).

La comparación de este tipo de eventos resulta de gran interés para entender la relación entre la respuesta biótica y el calentamiento. Estudios recientes indican que, durante los eventos hipertermales, la diversidad de los foraminíferos bentónicos descendió como consecuencia del estrés ambiental provocado por el calentamiento y de los efectos colaterales del mismo, como cambios en la circulación oceánica y en el aporte de nutrientes a los fondos (Arreguín-Rodríguez et al., 2022). La rapidez de cada evento también influyó, aumentando la dificultad de adaptación de los foraminíferos en los eventos de

calentamiento más rápidos. Sin embargo, la correlación entre la magnitud del calentamiento y el descenso en la diversidad de los foraminíferos bentónicos no es lineal, y los hipertermales que se superponen al calentamiento gradual del Paleoceno y Eoceno inicial (Fig. 13) tuvieron efectos más marcados que los de los hipertermales superpuestos a la tendencia general de enfriamiento desde el Eoceno hasta el Oligoceno (Arreguín-Rodríguez et al., 2022). Dado que el aumento en la temperatura tiende a reducir la resiliencia de los ecosistemas marinos actuales (Arreguín-Sánchez, 2014), es posible que las condiciones de fondo más frescas desde el Eoceno medio contribuyeran a reducir el impacto de los hipertermales en los foraminíferos bentónicos.

Como conclusión, el análisis del comportamiento de los foraminíferos bentónicos durante eventos de distinta índole, rapidez y magnitud, como el impacto del asteroide en el límite Cretácico/Paleógeno, el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno y los múltiples eventos hipertermales del Paleógeno, aporta información sobre la respuesta de los ecosistemas oceánicos ante perturbaciones globales.

6.2. La exploración de Zelandia, el continente sumergido

En este último ejemplo resaltaré las aplicaciones de los foraminíferos bentónicos en exploración geológica y en la investigación de procesos fundamentales sobre el funcionamiento de nuestro planeta. Por su estrecha relación con las condiciones del fondo marino, y dado que su abundancia, diversidad, y composición específica muestran tendencias bastante regulares en función de la profundidad del medio, los foraminíferos bentónicos se vienen empleando desde antiguo para realizar reconstrucciones paleobatimétricas (Murray, 1973; Boltovskoy, 1978). La distribución

de las especies bentónicas está controlada por una serie de parámetros ambientales relacionados con el gradiente de profundidad, como el tipo de sustrato, la temperatura del agua, el tamaño de grano del sedimento, la luz, presión, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, etc. Estas variables a su vez caracterizan diferentes masas de agua, y permiten establecer zonas batimétricas basadas en foraminíferos bentónicos (Van Morkhoven et al., 1986). La inferencia del medio de depósito y su profundidad a través de foraminíferos bentónicos le confiere a este grupo un valor añadido en geología, y como se muestra a continuación, incluso en la exploración de un continente prácticamente desconocido: Zelandia.

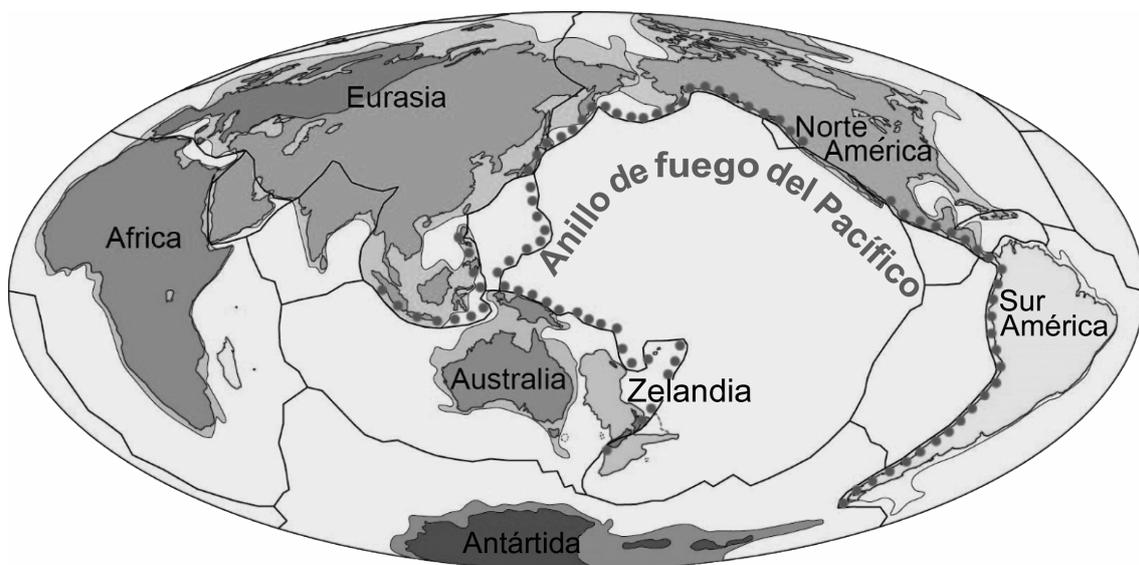


Figura 14: Mapa global de los siete continentes, y extensión del continente Zelandia. La línea de puntos marca las zonas de subducción que conforman el denominado "anillo de fuego del Pacífico". Modificado de Mortimer et al. (2017).

Zelandia es un continente que se encuentra sumergido casi en su totalidad bajo las aguas del Pacífico suroeste, y del que sólo afloran sus montañas más altas: Nueva Zelanda, Nueva Caledonia, y unas pequeñas islas del Pacífico (Fig. 14). Se le ha apodado como "el nuevo continente", pero este calificativo no es muy acertado, porque el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas ya hizo sospechar de su existencia hacia los años 70 del siglo pasado. Sin embargo, su

localización remota, el hecho de que el 94% de su superficie se encuentra sumergida bajo el océano Pacífico, y los obstáculos legales para su exploración relacionados con los intereses económicos de los territorios colindantes (Australia, Nueva Zelanda, Nueva Caledonia), retrasaron durante décadas su estudio. No fue hasta 2017 cuando Nick Mortimer y colaboradores demostraron que Zelandia es el séptimo continente, y que se extiende a lo largo de 4,9 millones de kilómetros cuadrados bajo el Pacífico Suroeste (Mortimer et al., 2017).

El continente de Zelandia se separó de Australia y de la Antártida hace unos 80 millones de años, en el Cretácico. Tradicionalmente se había aceptado que, a medida que el Mar de Tasmania se fue abriendo, Zelandia comenzó una larga historia de separación, rotación y subsidencia, permaneciendo sumergida bajo el océano Pacífico y Mar de Tasmania hasta la actualidad. Sin embargo, eran muchas las incógnitas que se planteaban en torno a la evolución de este continente.

Zelandia está situada en el “anillo de fuego del Pacífico”, una franja de zonas de subducción que circunda las costas del gran océano, y donde la corteza oceánica se hunde bajo la corteza continental a través de planos inclinados, generando la mayor actividad sísmica y volcánica del planeta. Los sistemas de subducción son los principales motores de la tectónica de placas, de la dinámica del manto y de los ciclos geoquímicos globales. Sin embargo, no se conoce a ciencia cierta cómo se inician los procesos de subducción, cuáles son las condiciones iniciales, cómo evolucionan las fuerzas y la cinemática, o cuáles con sus consecuencias a corto plazo y su impronta en la superficie (elevación, subsidencia, creación de cuencas sedimentarias profundas, convergencia, extensión, vulcanismo, etc.). El estudio de registros clave en el margen suroeste de la placa del Pacífico (sistema Tonga-Kermadec) proporciona una excelente oportunidad para mejorar el conocimiento de los procesos de subducción.

El estudio de este continente cobra aún más interés al constatar que Zelandia se sitúa en una zona donde los modelos predictivos del

cambio climático presentan problemas. Los escasos datos procedentes de antiguos sondeos indican temperaturas extremadamente cálidas para esta región del Pacífico Suroeste durante el Paleógeno, y discrepan notablemente de las predicciones generadas con los modelos paleoclimáticos disponibles (Sutherland et al., 2018). Si estos modelos no son capaces de reproducir las temperaturas del pasado, ¿cómo van a predecir de manera fiable las del futuro?. Las múltiples incertidumbres en esta región del Pacífico Suroeste, en la que los modelos paleoclimáticos presentan deficiencias en sus predicciones y donde existen muy pocos registros de la evolución biótica y paleoclimática durante el Paleógeno, apuntaban a la necesidad de realizar estudios detallados de Zelandia.

Con el objetivo de explorar en detalle este continente sumergido, conocer su evolución, reconstruir los movimientos de las placas tectónicas, mejorar el conocimiento sobre los procesos de subducción, reconstruir los cambios climáticos de los últimos 70 millones de años y mejorar los modelos predictivos, el consorcio *International Ocean Discovery Program* (IODP) organizó en 2017 una expedición a Zelandia. La expedición 371 del IODP se desarrolló a bordo del buque *Joides Resolution*, que partió de Townsville (noreste de Australia) el 27 de julio de 2017 y recorrió el norte de Zelandia, una vasta región del tamaño de la India, perforando sondeos submarinos. La expedición concluyó en la isla de Tasmania (Australia) dos meses después, el 26 de septiembre. A lo largo del recorrido se recuperaron casi 3 km de sondeos en seis localizaciones, situadas en el promontorio de Lord Howe, la fosa de Nueva Caledonia, la cuenca de Reinga (limitada al oeste por la cresta de Norfolk), y la llanura abisal de Tasmania (Fig. 15).

Los sondeos perforados en Zelandia han cambiado por completo lo poco que se sabía sobre este continente de geografía tan inusual, al encontrarse mayormente sumergido a más de 1500-2000 m de profundidad, mientras que los otros continentes tienen extensas áreas terrestres que afloran en superficie (Sutherland et al., 2020).

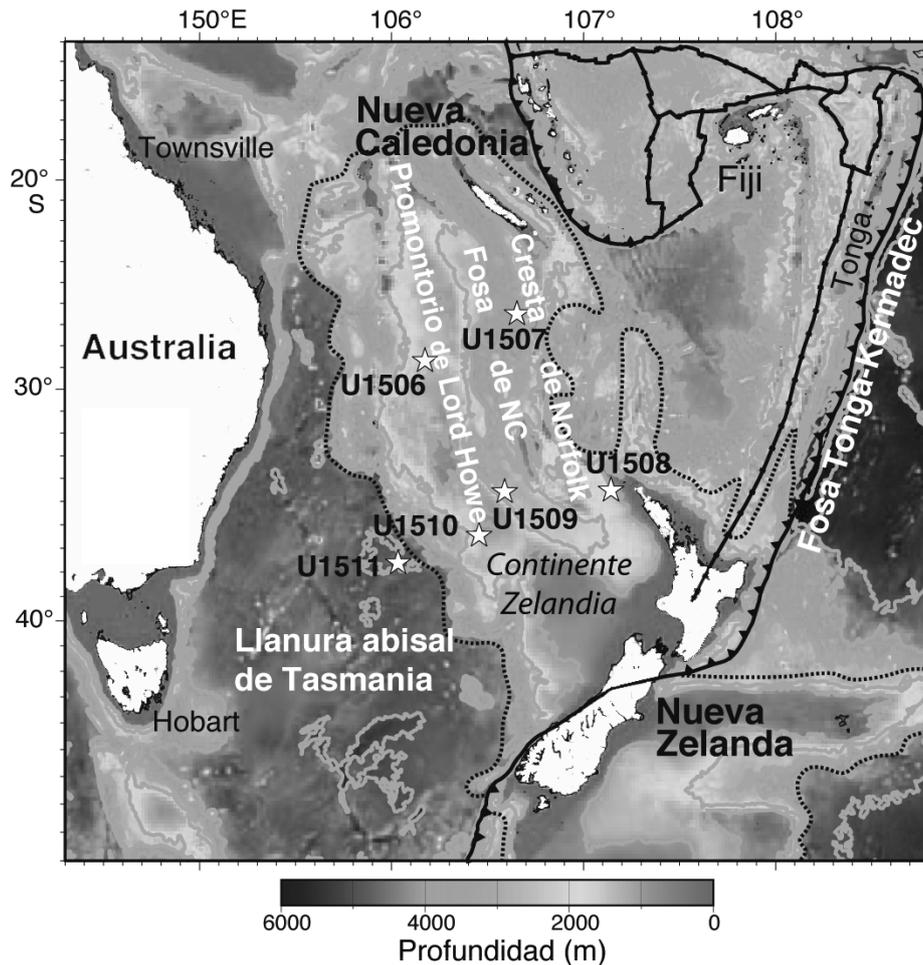


Figura 15: Localización de los seis sitios perforados (U1506-U1511, marcados con estrellas) durante la Expedición 371 del IODP en la mitad norte de Zelandia, en el Pacífico Suroeste. La línea de puntos señala la localización aproximada de Zelandia, según Mortimer et al. (2017). Fosa de NC: fosa de Nueva Caledonia. Modificado de Sutherland et al. (2019).

El estudio de los foraminíferos bentónicos ha permitido reconstruir cómo evolucionó la batimetría de las seis localidades estudiadas en el norte de Zelandia desde el Cretácico Superior (Fig. 16):

Promontorio de Lord Howe. En la actualidad, el sitio U1506, situado al norte del promontorio de Lord Howe, yace a 1495 m de profundidad. Los foraminíferos bentónicos indican que durante el Eoceno inferior (50 Ma) se situaba muy próximo a la superficie del océano, en una plataforma carbonatada somera, y que durante el Eoceno medio, hace 45 Ma, se produjo subsidencia hasta los 600 m de

profundidad. El sitio U1510, situado al sur del promontorio y a 1238 m de profundidad en la actualidad, se depositó a unos 600 m de profundidad durante el Eoceno, y la presencia de taxones neríticos indica transporte de material arrastrado desde una plataforma somera cercana. Los perfiles sísmicos en ambas localidades indican discordancias erosivas en el Eoceno-Oligoceno. A nivel regional, existen datos previos que apoyan la existencia de niveles muy someros, con *Ostrea*, durante el Oligoceno inferior, y que confirman que hubo zonas elevadas durante el Eoceno-Oligoceno.

Cuenca de Reinga. Limita al oeste con la cresta de Norfolk, y en ella se perforó el sondeo U1508, a 1609 m de profundidad en la actualidad. La disposición de los sedimentos en “*onlap*” indica deformación en esta región hace 39 Ma. Las calizas del Oligoceno contienen especies de foraminíferos típicas de medios batiales a partir de 800-1000 m de profundidad, mezcladas con especies de plataforma somera y con un registro de palinoflora indicativo de zonas emergidas cercanas.

Fosa de Nueva Caledonia. En el sitio U1507, en la mitad norte de la fosa, los foraminíferos bentónicos indican una profundidad de unos 1400 m durante el Eoceno superior (40 Ma), y una subsidencia progresiva hasta la actualidad (3568 m). El Sitio U1509, al sur de la fosa, ofrece un raro registro sedimentario del Cretácico Superior y Paleoceno fuera de Nueva Zelanda. Los foraminíferos bentónicos del Cretácico Superior indican un depósito a unos 500 m de profundidad, pero la presencia de esporas de helechos y fragmentos de plantas indica que había tierra firme en las inmediaciones. Tras un hiato de 2 millones de años que incluye el límite Cretácico/Paleógeno, los foraminíferos del Paleoceno reflejan un medio oceánico abierto, de al menos 1000 m de profundidad, y los del Eoceno medio indican profundidades abisales, de unos 2000 m, que fueron aumentando hasta los 2911 m en la actualidad. Se trata por tanto de una localización de gran interés porque refleja unos 2000 m de subsidencia durante el Cenozoico, registrándose la mayor parte de ésta entre 59 y 45 Ma.

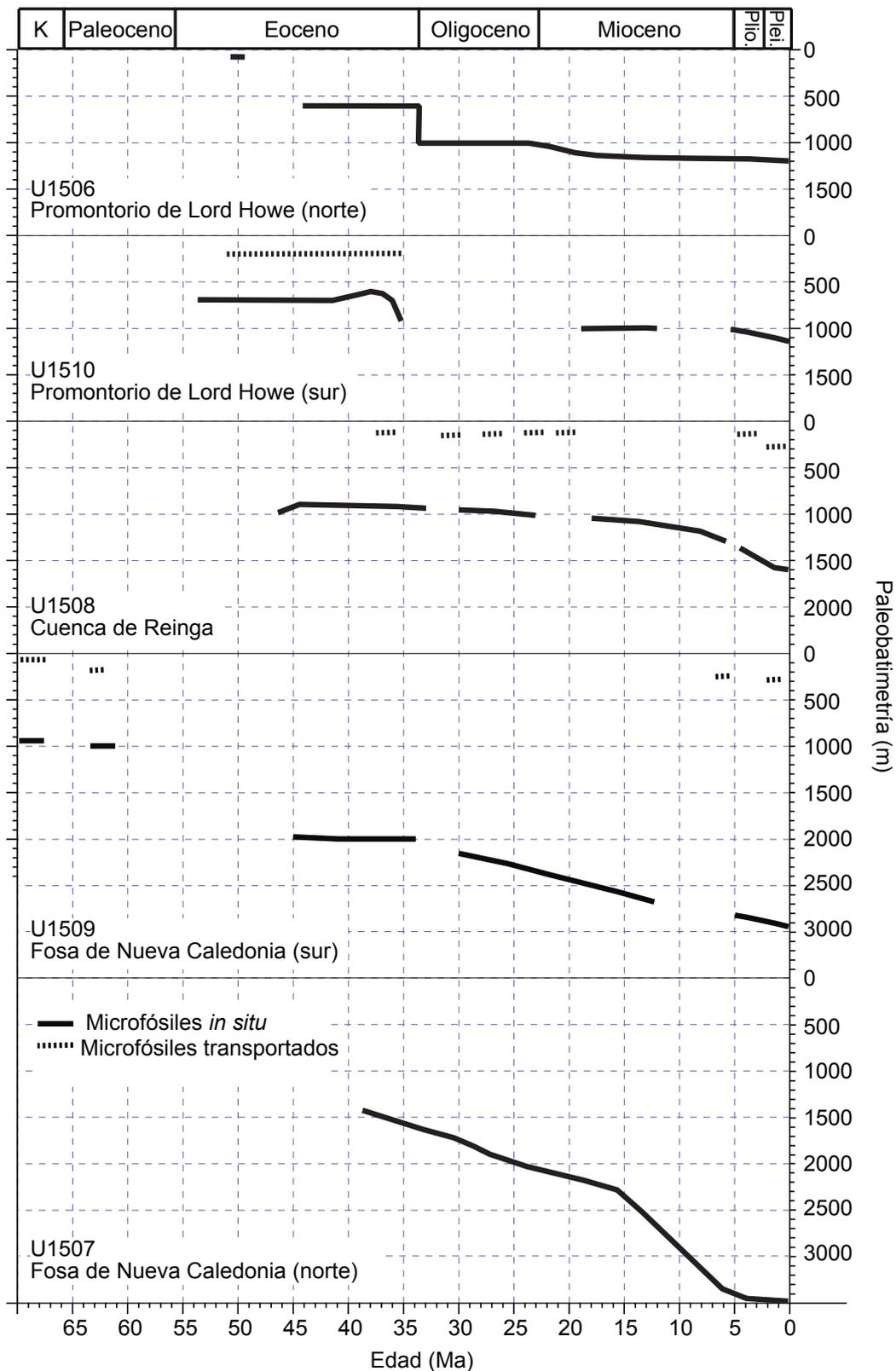


Figura 16: Evolución batimétrica de los sitios perforados durante la Expedición 371 del IODP en el norte de Zelandia, modificado de Sutherland et al. (2020). No se incluye el Sitio U1511 (llanura abisal de Tasmania). Las líneas continuas indican profundidad inferida a partir de foraminíferos bentónicos autóctonos. Las líneas discontinuas indican transporte de microfósiles desde zonas más someras. K: Cretácico. Plio: Plioceno. Plei: Pleistoceno.

Llanura abisal de Tasmania. En esta cuenca distal se perforó el sitio U1511 a 4847 m de profundidad, y las asociaciones de foraminíferos indican que se depositó en profundidades abisales desde el Paleoceno hasta la actualidad. La mayor parte del tiempo estuvo situado por debajo del nivel de compensación del carbonato, por lo que predominan los fósiles de caparzones no carbonatados, como microfósiles silíceos y foraminíferos bentónicos de conchas aglutinadas. Estos últimos presentan una gran diversidad y una conservación excepcional de sus caparzones, que muestran su volumen tridimensional original y muy poca alteración por la diagénesis y por la compactación del sedimento. Las asociaciones del Paleoceno están compuestas por especies cosmopolitas que han sido previamente identificadas en otros océanos, como el Atlántico o el Tethys. Tradicionalmente se había considerado que los foraminíferos bentónicos de esta región estaban marcados por un fuerte endemismo de las especies, pero los nuevos resultados indican que no hubo provincialismo en las faunas de foraminíferos aglutinados de medios profundos (Kaminski et al., 2021).

Estas interpretaciones paleobatimétricas han permitido mejorar el conocimiento de la paleogeografía regional, e inferir cómo y cuándo el norte de Zelandia fue modelado por la actividad tectónica relacionada con el inicio de la subducción en el Pacífico occidental (Sutherland et al., 2020). La separación de Gondwana durante el Cretácico probablemente adelgazó la corteza de Zelandia, pero se han registrado importantes movimientos verticales en una amplia región. Así, los foraminíferos bentónicos han contribuido de forma significativa a concluir que el norte de Zelandia experimentó grandes movimientos verticales a lo largo del tiempo. El promontorio de Lord Howe se elevó al menos 1 km, con una migración de su movimiento hacia el sureste entre 50 y 35 Ma. Los 2000 m de subsidencia de la Fosa de Nueva Caledonia son consistentes con otros registros y con la evolución de las cuencas colindantes, que muestran un patrón común de transgresión post-rift y subsidencia a largo plazo (Crouch et al.,

2022). Si esta subsidencia está causalmente relacionada con el comienzo de la subducción, el registro del Cretácico y Paleoceno del sitio U1509 representaría una de las primeras señales de subducción (entre 67 y 60 Ma; Crouch et al., 2022) encontradas en todo el Pacífico occidental. La cuenca de Reinga muestra deformación hace 39 Ma, y una máxima elevación alcanzada entre 23-26 Ma, lo que permite refutar la hipótesis de máxima inundación de Zelandia hasta quedar totalmente por debajo del nivel del mar durante el tránsito Eoceno-Oligoceno (25-23 Ma). Por el contrario, estos resultados indican que existieron refugios terrestres durante el intervalo de máxima transgresión en el norte de Zelandia, y tienen claras implicaciones sobre los patrones evolutivos y biogeográficas (endemismos de especies terrestres en Nueva Zelanda, rutas migratorias, reconstrucciones de relojes moleculares, filogenias basadas en fósiles, etc.) que se podrán explorar en el futuro.

Los datos de paleobatimetría y de evolución del norte de Zelandia a lo largo del tiempo han llevado a proponer un nuevo modelo de subducción (Sutherland et al., 2020), mejorando el conocimiento sobre este tipo de fenómenos globales, sobre su relación con la tectónica de placas, y sus consecuencias (modelado de continentes, riesgos geológicos, formación de recursos minerales, etc.). En definitiva, los foraminíferos bentónicos han contribuido a estudios multidisciplinarios que analizan fenómenos globales como los procesos de subducción, y han demostrado ser una herramienta excelente para la exploración en geología, trazando la evolución de un continente. Además, han contribuido y siguen contribuyendo a conocer mejor los eventos de calentamiento del Paleoceno y Eoceno que aparecen registrados en los sondeos de Zelandia, a comprender la respuesta de los ecosistemas marinos, y a entender el posible papel de factores paleogeográficos o paleoceanográficos (Alegret et al., 2021c). Los registros de eventos hipertermales de Zelandia permitirán mejorar los modelos paleoclimáticos en esta región enigmática y prácticamente inexplorada.

7. Conclusiones

La Micropaleontología es una disciplina eminentemente aplicada, y gracias al cuerpo de conocimiento construido por cientos de investigadores en el pasado, el estudio de fósiles microscópicos permite resolver grandes cuestiones evolutivas y geológicas. Los foraminíferos bentónicos en particular son un grupo de especial interés. Por su pequeño tamaño, presencia en el mayor hábitat del planeta, registro continuo a lo largo de millones de años, facilidad de fosilización y su estrecha relación con los parámetros ambientales, constituyen el mejor registro fósil de organismos que habitaban los fondos oceánicos durante el Mesozoico y Cenozoico, y son herramientas excelentes para el estudio de fenómenos globales.

Los foraminíferos bentónicos han aportado datos decisivos para el estudio de eventos globales como el impacto del asteroide en el límite Cretácico/Paleógeno, precisando las consecuencias ambientales en los océanos, falsando hipótesis tradicionalmente aceptadas y apoyando mecanismos alternativos que expliquen la quinta gran extinción en masa. El análisis geoquímico de sus caparazones fosilizados ha permitido reconstruir la evolución de la temperatura y del ciclo del carbono a lo largo de millones de años. El estudio de su comportamiento durante eventos de calentamiento del pasado, como el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno y otros eventos hipertermales del Paleógeno, aporta información sobre la respuesta de los ecosistemas oceánicos ante perturbaciones globales del ciclo del carbono, y permite usar los eventos del pasado como análogos del actual cambio climático, y nutrir las bases de datos en las que se fundamentan los modelos paleoclimáticos, contribuyendo a mejorar las predicciones de cara al futuro.

La estrecha relación entre las distintas especies de foraminíferos bentónicos, las condiciones del fondo marino y el gradiente de profundidad, permite reconstruir el medio de depósito y la

paleobatimetría. Por este motivo fueron tradicionalmente empleados en la exploración de recursos naturales, y han desempeñado un papel fundamental para trazar la evolución del continente sumergido, Zelandia. Los estudios de los foraminíferos bentónicos en los sondeos perforados en el norte de Zelandia durante la expedición IODP 371 han permitido reconstruir la paleobatimetría y la evolución de esta región a lo largo de los últimos 70 millones de años, y han llevado a proponer un nuevo modelo de subducción, mejorar el conocimiento sobre este proceso, sobre su relación con la tectónica de placas, y sus consecuencias. En definitiva, la integración de los foraminíferos bentónicos en estudios multidisciplinarios ha contribuido de forma significativa a la exploración del séptimo continente.

El estudio de los fósiles microscópicos permite, por tanto, inferir cómo eran los organismos y los ecosistemas en los que vivían. Al reducir a polvo sus caparzones fosilizados y analizar su composición isotópica, damos un salto de gigantes para calcular la temperatura de hace millones de años, la composición de la atmósfera del pasado, o reconstruir las corrientes oceánicas. Y más allá de los múltiples ejemplos que demuestran la utilidad de los foraminíferos bentónicos, la Micropaleontología, y la Paleontología en general, son mucho más que la reconstrucción del pasado de la vida a través del estudio de los fósiles. Son mucho más que analizar la evolución de los organismos desde su origen, los ambientes en los que vivieron y las interacciones entre ellos. No se limitan a estudiar el pasado como algo muerto, sino que permiten conocer la respuesta de nuestro planeta a eventos globales, comprender la vida y los ecosistemas actuales, e incluso predecir las posibles consecuencias del actual cambio climático. Son una ventana que nos permite estudiar el pasado para entender el presente y mirar hacia el futuro.

8. Referencias

- Alegret, L. (2014). Extinción y no extinción. En: Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel – Dinópolis (Ed.), Royo-Torres et al., coord., *Fundamental!*, 24: 7-10.
- Alegret L. y Thomas E. (2007). Deep-Sea environments across the Cretaceous/Paleogene boundary in the eastern South Atlantic Ocean (ODP Leg 208, Walvis Ridge). *Marine Micropaleontology*, 64: 1-17.
- Alegret L. y Thomas E. (2009). Food supply to the seafloor in the Pacific Ocean after the Cretaceous/Paleogene boundary event. *Marine Micropaleontology*, 73: 105-116.
- Alegret L., Ortiz S., Orue-Etxebarria X., Bernaola G., Baceta J. I., Monechi S., Apellaniz E., Pujalte V. (2009). The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: new data from the microfossil turnover at the Zumaia section, Spain. *Palaios*, 24: 318-328
- Alegret L., Ortiz S., Arenillas, I., Molina E. (2010). What happens when the ocean is overheated? The foraminiferal response across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Spain). *Geological Society of America Bulletin*, 122 (9/10): 1616-1624.
- Alegret L., Thomas E. y Lohmann, K C. (2012). End-Cretaceous marine mass extinction not caused by productivity collapse. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (3): 728-732.
- Alegret, L., Hayward, B. W., Leckie, R. M., Pearson, P. N. (2021a). The 2020 Joseph A. Cushman award to Ellen Thomas. *Journal of Foraminiferal Research* 51 (1): 1-3.
- Alegret, L., Arreguín-Rodríguez, G. J., Trasviña-Moreno, C. A., Thomas, E. (2021b). Turnover and stability in the deep sea: benthic foraminifera as tracers of Paleogene global change. *Global and Planetary Change*, 196, 103372.

- Alegret, L., Harper, D. T., Agnini, C., Newsham, C., Westerhold, T., Cramwinckel, M. J., Dallanave, E., Dickens, G. R., Sutherland, R. (2021c). Biotic Response to early Eocene Warming Events: Integrated Record from Offshore Zealandia, north Tasman Sea. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36, e2020PA004179,
- Alegret, L., Arreguín-Rodríguez, G. J. y Thomas, E. (2022). Oceanic productivity after the Cretaceous/Paleogene impact: where do we stand? The view from the deep. En: Koeberl, C., Claeys, P., Montanari, A., eds., *From the Guajira desert to the Apennines, and from Mediterranean microplates to the Mexican killer asteroid: Honoring the career of Walter Alvarez*. Geological Society of America Special Paper 557, cap. 21: 449-470.
- Alve, E. y Goldstein, S. T. (2010). Dispersal, survival and delayed growth of benthic foraminiferal propagules. *Journal of Sea Research*, 63: 36–51.
- Álvarez, L. W., Álvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208: 1095-1108.
- Arreguín-Rodríguez, G. J., Alegret, L., Sepúlveda, J., Newman, S., Summons, R. E. (2014). Enhanced terrestrial input supporting the *Glomospira* acme across the Paleocene-Eocene boundary in Southern Spain. *Micropaleontology*, 60 (1): 43-51.
- Arreguín-Rodríguez, G. J., Thomas, E. y Alegret, L. (2022). Some like it cool: Benthic foraminiferal response to Paleogene warming events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 593, 110925.
- Arreguín-Sánchez, F. (2014). Measuring resilience in aquatic trophic networks from supply- demand of energy relationships. *Ecological Modelling*, 272: 271–276.
- Boltovskoy, E. (1978). La distribución batimétrica de los foraminíferos bentónicos. *Ameghiniana*, Revista de la Asociación Paleontológica Argentina, XV (3-4): 409-421

- Brönnimann, P. (1965). La Micropaléontologie, son caractère et ses tendances actuelles. *Archives des Sciences*, 18 (2): 327-340.
- Buchanan J. Y., Moseley, H. N. y Murray, J. T. 1885-1895. Narrative of the Voyage. En: *The Report of the Scientific Results of the Exploring Voyage of HMS Challenger during the years 1873-1876*. Londres, Edimburgo y Dublín, 1885-1895. vol. I, partes 1 y 2.
- Burkhardt, F. et al. (1985). *The correspondence of Charles Darwin*, vols. 1-12, 16. Cambridge University Press 1985-1994; (Carta de C. Darwin a W. B. Carpenter también disponible en *Darwin Correspondence Project*, Letter no. 8869, <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-8869.xml>)
- Cifelli, R. y Richardson, S. L. (1990). A history of the classification of Foraminifera (1826-1933). *Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication*, 27: 1-119.
- Crouch, E. M., Clower, C. D., Raine, J. I., Alegret, L., Cramwinckel, M. J., Sutherland, R. (2022). Latest Cretaceous and Paleocene biostratigraphy and paleogeography of northern Zealandia, IODP Site U1509, New Caledonia Trough, southwest Pacific. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, doi.org/10.1080/00288306.2022.2090386
- Cui, Y., Kump, L. R., Ridgwell, A. J., Charles, A. J., Junium, C. K., Diefendorf, A. F., Freeman, K. H., Urban, N. M., Harding, I. C. (2011). Slow release of fossil carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Geoscience*, 4: 481-485.
- De Laubenfels, M. W. (1956). Dinosaurs extinction: one more hypothesis. *Journal of Paleontology*, 30 (1): 207-218.
- D'Hondt, S., Donaghay, P., Zachos, J. C., Luttenberg, D., Lindinger, M. (1998). Organic carbon fluxes and ecological recovery from the Cretaceous-Tertiary mass extinction. *Science*, 282: 276-279.
- Dunkley Jones, T., Lunt, D. J., Schmidt, D. N. Ridgwell. A., Sluijs, A, Valdes, P. J., Maslin, M. A. (2013). Climate model and proxy data

- constraints on ocean warming across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Earth Science Reviews*, 125: 123-145.
- Fernández López, S. (1989). La materia fósil. Una concepción dinamicista de los fósiles. En: Aguirre, E. (ed.) *Nuevas tendencias en Paleontología*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid: 25-45.
- Gaines, S. M., Eglinton, G. y Rullkotter, J. (2009). *Echoes of Life: What Fossil Molecules Reveal about Earth History*. Oxford University Press, 355 págs.
- Gillooly, J. F., Brown, J., West, G. B., Savage, V. M., Charnov, E. L. (2001). Effects on size and temperature on metabolic rate. *Science*, 293: 2248–2251.
- Hammer, Ø. y Harper, D. A. T. (2006). *Paleontological Data Analysis*. Blackwell Publishing.
- Henehan, M., Ridgwell, A., Thomas, E., Zhang, S., Alegret, L., Schmidt, D. N., Rae, J. W. B., Witts, J. D., Landman, N. H., Greene, S., Huber, B. T., Super, J., Planavsky, N. J., Hull, P. M. (2019). Rapid ocean acidification and phased biogeochemical recovery following the end-Cretaceous Chicxulub impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (45): 22500-22504.
- Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D. N., Thomas, E., Gibbs, S. J., Sluijs, A., Zeebe, R., Kump, L., Martindale, R. C., Greene, S. E., Kiessling, W., Ries, J., Zachos, J. C., Royer, D. L., Barker, S., Marchitto, T. M., Moyer, R., Pelejero, C., Ziveri, P., Foster, G. L., Williams, B. (2012). The geological record of ocean acidification. *Science*, 335: 1058–1963.
- Hsü, K. J. y McKenzie, J. (1985). A “Strangelove Ocean” in the earliest Tertiary. *Geophysical Monographs*, 32: 487-492.
- Huber, M. y Thomas, E. (2008). Paleooceanography: Greenhouse Climates. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, Steele et al., eds. Elsevier, 4229-4239.
- Hull, P. M. y Norris, R. D. (2011). Diverse patterns of ocean export productivity change across the Cretaceous-Paleogene boundary:

new insights from biogenic barium. *Paleoceanography* (PA2010002082).

Hull, P., Bornemann, A., Penman, D., Henehan, M. J., Norris, R. D., Wilson, P. A., Blum, P., Alegret, L., Batenburg, S., Bown, P., Bralower, T. J., Cournede, C., Deutsh, A., Donner, B., Friedrich, O., Jehle, S., Kim, H., Kroon, D., Lippert, P., Loroch, D., Moebius, I., Moriya, K., Peppe, D. J., Ravizza, G., Röhl, U., Schueth, J. D., Sepulveda, J., Sexton, P., Sibert, E., Sliwinska, K., Summons, R., Thomas, E., Westerhold, T., Whiteside, J., Yamaguchi, T., Zachos, J. C. (2020). On Impact and Volcanism across the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 367: 266-272.

IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático), 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 págs, doi:10.1017/9781009325844.

Kaminski, M. A., Geroch, S. y Kaminski, D. G. (eds.). (1993). *The Origins of Applied Micropaleontology: The School of Josef Grzybowski*. Alden, 336 págs.

Kaminski, M. A., Alegret, L., Hikmahtiar, S., Waskowska, A. (2021). The Paleocene of IODP Site U1511, Tasman Sea: A lagerstätte deposit for deep-water agglutinated foraminifera. *Micropaleontology*, 67 (4): 341-364.

Linklater, E. (1982). *El viaje del Challenger (1872-1876)*. Ediciones del Serbal, Barcelona, 272 págs.

López Martínez, N. y Truyols, J. (1994). *Paleontología. Conceptos y métodos*. Editorial Síntesis, 19, 334 págs.

Ma, Z., Gray, E., Thomas, E., Murphy, B., Zachos, J. C., Paytan, A. (2014). Carbon sequestration during the Paleocene-Eocene Thermal

- maximum by an efficient biological pump. *Nature Geoscience*, 7: 382–388.
- Marland, G., Boden, T.A. y Andres, R. J. (2005). Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions. En: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. CO₂ Information Center, Oak Ridge Nat. Laboratory. http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.htm
- Matute, A. M. (1998). *En el bosque: una defensa de la fantasía*. Discurso de toma de posesión del sillón “K” de la Real Academia de la Lengua Española, 18 de enero de 1998.
- Molina, E. (2003). Guillermo Colom, gran pionero de la Micropaleontología española. En: G. Mateu, ed. *Guillem Colom Casanovas, naturalista i geòleg: pioner i mestre de la Micropaleontologia espanyola*. Universitat de les Illes Balears, 79-88.
- Molina, E. (2015). Evidence and causes of the main extinction events in the Paleogene based on extinction and survival patterns of foraminifera. *Earth-Science Reviews*, 140: 166-181.
- Molina, E. (2017). Micropaleontología. Concepto, historia y estado actual. En: Molina, E. (Ed.), *Micropaleontología* (3ª edición). Prensas de la Universidad de Zaragoza. Colección de Textos Docentes 93, cap. 1: 11-31.
- Mortimer, N., Campbell, H. J., Tulloch, A. J., King, P. R., Stagpoole, V. M., Wood, R. A., Rattenbury, M. S., Sutherland, R., Adams, C. J., Collot, J., Seton, M. (2017). Zealandia: Earth’s hidden continent. *GSA Today*, 27(3): 27–35.
- Murray, J. W. (1973). *Distribution and ecology of living benthic foraminiferids*. Crane, Russak and Co., New York, N. Y., 274 págs.
- Murray, J. W. (1991). *Ecology and palaeoecology of benthic foraminifera*. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 397 págs.
- Murray, J. W. (2006). *Ecology and Applications of the Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press, UK, 426 págs.
- Ohno, S., Kadono, T., Kurosawa, K., Hamura, T., Sakaiya, T., Shigemori, K., Hironaka, Y., Sano, T., Watari, T., Otani, K., Matsui, T., Sugita, S.

- (2014). Production of sulphate-rich vapour during the Chicxulub impact and implications for ocean acidification. *Nature Geoscience*, 7: 279-282.
- Pearson, P. N. y IODP Expedition 363 Shipboard Scientific Party (2018). A deep-sea agglutinated foraminifer tube constructed with planktonic foraminifer shells of a single species. *Journal of Micropalaeontology*, 37: 97-104.
- Ramírez-Llodra, E., Brandt, A., Danovaro, R., De Mol, B., Escobar, E., German, C. R., Levin, L. A., Martínez Arbizu, P., Menot, L., Buhl-Mortensen, P., Narayanaswamy, B. E., Smith, C. R., Tittensor, D. P., Tyler, P. A., Vanreusel, A., Vecchione, M. (2010). Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem. *Biogeosciences*, 7: 2851-2899.
- Raup, D. M. y Sepkoski, J. J. (1982). Mass Extinctions in the Marine Fossil Record. *Science*, 215: 1501- 1503.
- Reuss, A. E. (1862). Paläontologische Beiträge. II. Die Foraminiferen des Kreidetuffes von Maastricht. *K. Akad. Wiss, Math.-Naturwiss. Kl., Vienna*, 44: 304-324.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Barton, P., Bralower, T., Bown, P. R., Christeson, G. L., Claeys, P., Cockell, C. S., Collins, G. S., Deutsch, A., Goldin, T., Johnson, K. D., Goto, K., Grajales, J. M., Grieve, R., Gulick, S., Kiessling, W., Koeberl, C., Kring, D. A., MacLeod, K. G., Matsui, T., Melosh, J., Montanari, A., Morgan, J. V., Neal, C. R., Nichols, D. J., Norris, R. D., Pierazzo, E., Ravizza, G., Rebolledo, M., Reimold, U., Robin, E., Salge, T., Speijer, R. P., Sweet, A. R., Urrutia, J., Vajda, V., Whalen, M. T., Willumsen, P. (2010). The Chicxulub impact and the mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327: 1214-1218.
- Sepúlveda, J., Wendler, J., Summons, R. E., Hinrichs, K. U. (2009). Rapid resurgence of Marine Productivity after the Cretaceous-Paleogene mass Extinction. *Science*, 326: 129-132.

- Smit, J. y Hertogen, J. (1980), An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature*, 285: 198-200.
- Sutherland, R., Dickens, G. R., Blum, P., Asatryan, G., Agnini, C., Alegret, L., Bhattacharya, J., Bordenave, A., Chang, L., Collot, J., Cramwinckel, M. J., Dallanave, E., Drake, M. K., Etienne, S. J. G., Giorgioni, M., Gurnis, M., Harper, D. T., Huang, H. H. M., Keller, A. L., Lam, A. R., Li, H., Matsui, H., Morgans, H. E. G., Newsam, C., Park, Y.-H., Pascher, K. M., Pekar, S. F., Penman, D. E., Saito, S., Stratford, W. R., Westerhold, T., Zhou, X. (2018). Expedition 371 Preliminary Report: Tasman Frontier Subduction Initiation and Paleogene Climate. *International Ocean Discovery Program*, doi: 10.14379/iodp.pr.371.2018
- Sutherland, R., Dickens, G. R., Blum, P., Asatryan, G., Agnini, C., Alegret, L., Bhattacharya, J., Bordenave, A., Chang, L., Collot, J., Cramwinckel, M. J., Dallanave, E., Drake, M. K., Etienne, S. J. G., Giorgioni, M., Gurnis, M., Harper, D. T., Huang, H. H. M., Keller, A. L., Lam, A. R., Li, H., Matsui, H., Morgans, H. E. G., Newsam, C., Park, Y.-H., Pascher, K. M., Pekar, S. F., Penman, D. E., Saito, S., Stratford, W. R., Westerhold, T., Zhou, X. (2019). *Tasman Frontier Subduction Initiation and Paleogene Climate. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 371*, 307 pp. College Station, TX (International Ocean Discovery Program). ISSN World Wide Web: 2377-3189, doi: 10.14379/iodp.proc.371.2019
- Sutherland, R., Dickens, G. R., Blum, P., Agnini, C., Alegret, L., Asatryan, G., Bhattacharya, J., Bordenave, A., Chang, L., Collot, J., Cramwinckel, M. J., Dallanave, E., Drake, M. K., Etienne, S. J. G., Giorgioni, M., Gurnis, M., Harper, D. T., Huang, H. H. M., Keller, A. L., Lam, A. R., Li, H., Matsui, H., Morgans, H. E. G., Newsam, C., Park, Y. H., Pascher, K. M., Pekar, S. F., Penman, D. E., Saito, S., Stratford, W. R., Westerhold, T., Zhou, X. (2020). Continental-scale geographic change across Zealandia during Paleogene subduction initiation. *Geology*, 48, <https://doi.org/10.1130/G47008.1>
- Thomas, E. (2007). Cenozoic mass extinctions in the deep sea; what disturbs the largest habitat on Earth?. En: Monechi, S., Coccioni, R.,

- Rampino, M., eds., *Large Ecosystem Perturbations: Causes and Consequences*. Geological Society of America Special Paper 424, Boulder, CO, p. 1-24.
- Van Morkhoven, F. P. C. M., Berggren, W. A. y Edwards, A. S. (1986). *Cenozoic cosmopolitan deep-water benthic foraminifera*. Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine, Mem. 11, 421 págs.
- Wali, G. y Olsson, I. (1993). Professor Börje Kullenberg 1906–1991. *International Council for the Exploration of the Sea - Journal of Marine Science*, 50 (1): 101–102.
- Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A.J., Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., Barnett, J. S. K., Bohaty, S. M., De Vleeschouwer, D., Florindo, F., Frederichs, T., Hodell, D. A., Holbourn, A. E., Kroon, D., Laurentano, V., Littler, K., Lourens, L. J., Lyle, M., Paelike, H., Roehl, U., Tian, J., Wilkens, R. H., Wilson, P. A., Zachos, J. C. (2020). An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369: 1383–1387.
- Zachos, J. C., Dickens, G. R. y Zeebe, R. E. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451: 279-283.

**CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. D. ANTONIO CENDRERO UCEDA**

Excelentísimo Señor Presidente,

Excelentísimos miembros de la Academia,

Señoras y señores,

Queridos amigos,

Es para mí una gran satisfacción responder al discurso de ingreso de la Profesora Laia Alegret Badiola y considero un honor haber sido designado para ello. El ingreso de un nuevo miembro de la corporación es siempre motivo de alegría, que se ve acentuada en este caso por la juventud y brillantez de la nueva Académica.

En su obra *El mundo por de dentro* (1627), decía Quevedo: “Dios te libre, lector, de prólogos largos...”. Pienso que eso es también aplicable a los epílogos en general, y especialmente a estas palabras que sirven de cierre a la interesante y documentada presentación que acaba de hacer la Dra. Alegret. Por ello, no es mi intención extenderme en esta respuesta, sino simplemente presentar unas pinceladas descriptivas de los méritos de nuestra nueva compañera, y comentar brevemente sus principales contribuciones al avance de las Ciencias Geológicas.

Trayectoria académica

Laia Alegret se licenció en Ciencias Geológicas en 1998, en la Universidad de Zaragoza, y obtuvo su Doctorado, *cum laude* y Premio Extraordinario, en 2002. A pesar de su juventud, ha tenido una notable trayectoria científica y un considerable reconocimiento, nacional e internacional.

Académica Correspondiente de esta casa desde 2019, ha obtenido en el ámbito nacional destacados contratos o puestos de carácter competitivo, tales como la beca post-doctoral del Ministerio de Educación y Ciencia para investigar en el Reino Unido, beca Leonardo de la Fundación BBVA, y los contratos Juan de la Cierva y Ramón y Cajal. Tiene reconocidos tres sexenios de investigación (el máximo posible para su edad, contabilizado desde el primer año tras su licenciatura) y uno de transferencia. Es Profesora Titular de la Universidad de Zaragoza desde 2010, y Catedrática desde 2022.

El aprecio de su tarea científica en el ámbito nacional es destacado. Ha impartido numerosas conferencias en distintos centros de España, organizado o formado parte de comités científicos de congresos, participado en jurados de premios científicos, comisiones y tribunales y ha actuado como evaluadora de proyectos de investigación para distintos organismos, incluyendo la Agencia Estatal de Investigación. Todo ello pone de manifiesto un amplio reconocimiento de sus méritos, y la consideración de su criterio y buen hacer por parte de organismos nacionales muy diversos.

En lo que se refiere a su experiencia internacional, son de destacar sus distintas estancias en el *University College* de Londres, donde, entre 2003 y 2009 y con una duración de unos tres años en total, llevó a cabo su tarea investigadora e impartió docencia teórica y práctica en varias asignaturas. Su trabajo en esta institución, donde colaboró con el Prof. Michael Kaminski, se centró esencialmente en reconstrucciones paleoambientales de los tránsitos Cretácico/Paleógeno y Paleoceno/Eoceno, basadas en foraminíferos bentónicos, en cortes de diversas regiones del mundo, así como en el análisis del patrón de recuperación de las comunidades bentónicas tras diversos eventos.

De manera regular ha realizado estancias de investigación en centros de diferentes países. En su etapa pre-doctoral realizó estancias en la Academia Polaca de las Ciencias (Varsovia, 1999), en la Universidad de Nuevo León (Linares, México, 1999), en el *National Museum of Natural History (Smithsonian Museum)* (Washington DC.,

EEUU, 2000), y en *Wesleyan University* (Connecticut, Estados Unidos, 2001). En estas instituciones desarrolló parte de su trabajo sobre el límite Cretácico/Paleógeno, colaborando con especialistas como Danuta Peryt y Ellen Thomas en el estudio de los foraminíferos bentónicos, con Brian Huber en el estudio de la colección Cushman, y realizando trabajo de campo en secciones mexicanas.

Tras doctorarse, llevó a cabo el estudio sedimentológico y muestreo micropaleontológico de diversos cortes del tránsito Cretácico-Paleógeno en Cuba y Túnez durante sendas estancias en el Museo Nacional de Historia Natural, La Habana (Cuba), y en la *Faculté des Sciences de Tunis* (Túnez). Continuó sus estudios sobre foraminíferos y eventos del Paleógeno, y se especializó en análisis de isótopos estables, durante estancias de investigación en *University College* de Londres, *Yale University*, New Haven (EEUU.), *Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo"* (Urbino, Italia), *University of Colorado Boulder & Institute of Arctic and Alpine Research* (Colorado, EEUU.), y *Università degli Studi di Padova* (Padua, Italia). En 2011 fue invitada a impartir una conferencia en el *Massachusetts Institute of Technology* (EEUU), donde inició su colaboración con los Profs. Roger Summons y Julio Sepúlveda en análisis de geoquímica orgánica y biomarcadores. En la *Università di Napoli* (Nápoles, Italia) estudió los cambios ambientales y la recuperación subsiguiente a megaerupciones volcánicas. Asimismo, ha realizado estancias en los repositorios del *International Ocean Discovery Program* en Bremen (Alemania) y en College Station (Texas, Estados Unidos) para participar en reuniones de muestreo de sondeos obtenidos durante la campaña de perforación de El Kef y la Expedición IODP 371.

Nuestra nueva compañera ha dado claras muestras de liderazgo científico, como demuestra el haber sido investigadora principal en numerosos proyectos financiados por organismos autonómicos, nacionales e internacionales, tales como el Instituto de Estudios Altoaragoneses, la Universidad de Zaragoza, el Programa Ramón y Cajal, los planes nacionales del Ministerio de Ciencia (con diferentes

nombres en distintas etapas), la Fundación BBVA, las *Massachusetts Institute of Technology International Science and Technology Initiatives*, las *Abbey Research and Collaboration Awards*, la *European Science Foundation*, y la *International Union of Geological Sciences*.

Como lógica consecuencia de lo anterior, son numerosas las evidencias de la proyección internacional del trabajo de la Dra. Alegret. Por ejemplo, su nombramiento (2006-2009) como *Honorary Research Fellow* en el *University College* de Londres, y su designación para cargos de la máxima responsabilidad en organismos científicos de su especialidad. Presidenta del *Paleogene Deep-Water Benthic Foraminifera Working Group*, desde 2018. Presidenta (2020-2023), vicepresidenta (2016-2020) y secretaria (2012-2016) de la *International Subcommission on Paleogene Stratigraphy*. También, para la Fundación Nacional de Investigación de Flandes (2013-2015), que además le concedió la medalla Alfred Curtins, y para comités de evaluación de la Unión Europea (programas Marie Skłodowska-Curie y FP7 *Large Scale Integrating Projects*), y los comités nacionales de ciencia de Austria, Alemania, Francia, Bélgica, Países Bajos, Rumanía, Polonia y México. Ha pronunciado conferencias invitadas en distintos centros de alto prestigio, incluyendo *University College*, MIT, *Plymouth University*, y *Universiteit Leuven*.

Su presencia en congresos internacionales ha sido también destacada. Ha organizado 13 congresos o reuniones científicas internacionales, destacando el *9th International Workshop on Agglutinated Foraminifera* (2012), o sesiones científicas en los principales congresos de su especialidad, como *STRATI* (en sus 4 ediciones), *Climatic and Biotic Events of the Paleogene CBEP*, o *American Geophysical Union AGU Fall Meeting*, entre otros. Entre las conferencias plenarias impartidas, destacan las invitadas en los congresos *Climatic and Biotic Events of the Paleogene 2009* en Wellington, Nueva Zelanda, *FORAMS 2018* en Edimburgo, *The Micropaleontological Society Annual Meeting 2018* en Leeds, *GSA Connects 2022* en Denver. También, en el ámbito nacional, las Jornadas

de la Sociedad Española de Paleontología 2014, en Teruel, o las XIV Jornadas de Ciencias de la Tierra 2018, en Castellón.

Es editora de 3 revistas incluidas en el *Science Citation Index: Paleoceanography and Paleoclimatology, Journal of Micropaleontology y Episodes*, y ha actuado como editora de varios libros y 2 volúmenes especiales de las revistas *Micropaleontology y Newsletters on Stratigraphy*. Es revisora habitual de multitud de revistas del SCI, desde multidisciplinares como *Science* o *Geology*, hasta las más centradas en su especialidad como *Micropaleontology, Journal of Foraminiferal Research*, o *Journal of Micropaleontology*, por solo citar algunas.

Ruego disculpen la larga y prolija relación anterior, pero me parece adecuada para poner de manifiesto la amplia red de contactos y colaboraciones científicas de la nueva Académica, las múltiples evidencias de la repercusión internacional de sus trabajos y el respeto que se ha ganado entre la comunidad científica, así como su capacidad para obtener financiación de muy diversos organismos y programas nacionales e internacionales.

En su faceta docente, cabe destacar su participación, de manera ininterrumpida desde 2011 (y con muy altas valoraciones por parte de los participantes), en la *International School on Foraminifera*, el curso más prestigioso a nivel internacional en el campo de los foraminíferos, tal como pone de manifiesto el apoyo y reconocimiento que le prestan instituciones de alto prestigio como la *European Geosciences Union*, el *European Consortium for Ocean Research Drilling* o la *Micropaleontological Society*.

Mención especial merece el hecho de haber sido nombrada *Staff Scientist* de la Expedición 371 (*Tasman Subduction Frontier Expedition*, 2017) del principal programa mundial de perforación oceánica, el *International Ocean Discovery Program (IODP)*, en el Pacífico Suroeste, lo que le ha permitido tener un protagonismo destacado en un descubrimiento de importancia mundial, tal como comentaré más adelante.

Es autora de 183 publicaciones científicas, 82 de ellas en las principales revistas de su especialidad en el *Science Citation Index*, destacando algunas de muy alto impacto (*Science, PNAS*) y altamente citadas. Ha escrito 6 libros (y editado otros dos) y 34 capítulos de libros, contribuido con 192 comunicaciones en congresos e impartido 6 conferencias plenarias invitadas. El número de citas recibido, según *Google Scholar*, es 5207, con un índice H=37 (y H=31 en *Web of Science*), lo que es notable teniendo en cuenta tanto su edad como el tamaño de la comunidad científica a la que pertenece.

La Profa. Alegret ha demostrado también una alta capacidad para la divulgación científica y un gran interés en el desarrollo de nuevos procedimientos para comunicar la ciencia. Fue participante destacada en el proyecto *Education Through Exploration*, desarrollado en la *Arizona State University*, en el que contribuyó a la creación de salidas de campo de realidad virtual, para explicar afloramientos geológicos de relevancia mundial, y a la elaboración de un exitoso producto de aprendizaje sobre evolución, con el formato de un juego online de realidad virtual denominado "*Surviving Extinction*", cuyo impacto se vio reflejado en las noticias de la cadena CBS. El valor de esta iniciativa se ha visto reconocido por la concesión de un proyecto para continuar la digitalización de afloramientos geológicos de referencia mundial, en el marco de la *International Subcommission on Paleogene Stratigraphy* (IUGS).

Esa capacidad para hacer llegar la ciencia a amplios sectores sociales se aprecia a través de la difusión que su trabajo ha tenido en los medios de comunicación, internacionales y nacionales. Laia ha participado en proyectos de gran envergadura y con repercusión en medios de comunicación de ámbito mundial, como la Expedición 371 del *International Ocean Discovery Program* en el Mar de Tasmania para explorar el continente oculto de Zelandia. Además de la difusión alcanzada por la expedición, según la hemeroteca del Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón, en los últimos 4 años Laia Alegret ha generado de forma directa 72

noticias en medios nacionales e internacionales. Previamente a este registro, en los últimos 20 años sus investigaciones ya habían atraído la atención de medios de comunicación internacionales de primera línea, tales como *The Guardian*, *New York Times*, *National Geographic*, *The London Economic*, *The National Scotland*, *Metro*, *The Mirror*, *The Daily Express*, *Physorg.com*, CNET, América digital. Y también en los principales medios de prensa, radio y televisión nacionales. Son de destacar entrevistas y reseñas sobre varios de sus artículos, como por ejemplo: Alegret et al. (2012), publicado en *PNAS*, o Alegret et al. (2021) en *Paleoceanography and Paleoclimatology*, los publicados en *Science* junto a Schulte et al. (2010) y Hull et al. (2020), o en *PNAS* junto a Henahan et al. (2019).

Principales contribuciones

Es adecuado comentar, aunque sea de forma muy resumida, las principales investigaciones de la Dra. Alegret. En su investigación ha abordado los cambios climáticos y otros eventos globales del pasado, sus causas y consecuencias sobre el medio y sobre los procesos que tienen lugar en la superficie terrestre. Su trabajo se ha basado en el estudio de los foraminíferos bentónicos, unos organismos unicelulares que (como ha explicado ella en su discurso) ocupan el mayor hábitat del planeta, los fondos marinos batiales y abisales, y a partir de los cuales se puede obtener información que ayuda a comprender diferentes procesos de ámbito global. Los estudios cuantitativos de las poblaciones y los análisis geoquímicos de las conchas de los foraminíferos, permiten inferir las condiciones ambientales en medios marinos y trazar su evolución a lo largo del tiempo y, a partir de ello, profundizar en el conocimiento del funcionamiento del planeta en el pasado. Los datos así obtenidos por Laia, junto con los procedentes de distintos estudios multidisciplinarios, han contribuido de manera

notable a mejorar nuestro conocimiento sobre eventos pasados, y a falsar hipótesis ampliamente admitidas con anterioridad.

Las contribuciones de la Profa. Alegret reflejan el resultado de la amplia red de colaboraciones internacionales a la que me he referido anteriormente, tejida en poco más de 20 años, y que incluye más de un centenar de científicos, lo que ha permitido integrar resultados de estudios micropaleontológicos, geoquímicos, sedimentológicos, magnetoestratigráficos, biocronoestratigráficos y de modelización. Todo ello, como nos acaba de mostrar Laia en su exposición, ha ayudado de forma importante a mejorar nuestra comprensión de la respuesta del planeta a eventos globales pasados, tales como impactos de asteroides o cambios climáticos, y de fenómenos a gran escala como los procesos de subducción.

Trataré de resumir a continuación las contribuciones que considero más significativas, agrupadas, tal como ha hecho Laia en su discurso, en tres grandes temas: el impacto del límite Cretácico-Paleógeno; los eventos de calentamiento global durante el Mesozoico-Cenozoico; el nuevo continente (sumergido) de Zelandia.

Impacto y límite Cretácico-Paleógeno

El límite Cretácico-Paleógeno (K/Pg) fue objeto de su tesis doctoral, y lo ha abordado también en numerosos trabajos posteriores (Alegret y Thomas, 2001, 2004, 2005, 2007, 2009, 2013; Alegret et al., 2001 b, 2003, 2005, 2012; Soria et al., 2001; Henehan et al., 2019; Alegret et al., 2022). En uno de los primeros trabajos sobre este tema (Alegret et al., 2005), el estudio de un nuevo perfil del tránsito K/Pg en Cuba, apoyándose en el estudio de los foraminíferos bentónicos para la interpretación paleoambiental, el grupo de Laia aportó nuevas evidencias sobre la edad del impacto de Chicxulub (el cráter situado en la Península de Yucatán, México), que coincide con la edad de las extinciones y perturbaciones ambientales y sedimentológicas del

límite K/Pg. Concretamente, en el corte de Loma Capiro, el origen de la unidad clástica del K/Pg se pudo relacionar con el colapso de la plataforma de Cuba, causado por el impacto de Chicxulub. Esta aportación tuvo una amplia repercusión social, con reseñas publicadas en *The New York Times*, *The San Diego* y *Scienza Italia*.

A través del conjunto de los trabajos citados, pudo demostrar que la productividad primaria marina no sufrió un colapso global y duradero tras el impacto de un asteroide a finales del Cretácico (hace 66 millones de años), rebatiendo así la imagen de un océano agonizante que se había aceptado durante décadas para explicar la quinta gran extinción en masa. Sus estudios globales pusieron de manifiesto la ausencia de extinciones de los foraminíferos bentónicos que habitaban los fondos oceánicos, y fueron definitivos para refutar las hipótesis que se habían aceptado sin cuestionar desde los años 80. Los resultados obtenidos por Laia y sus colaboradores mostraron que el aporte de nutrientes al fondo marino tras el límite Cretácico/Paleógeno, no sólo no disminuyó de forma global, tal y como se había sugerido tradicionalmente, sino que además aumentó en determinadas áreas, como el Océano Pacífico. Pudieron proponer a partir de ello una explicación alternativa, un rápido evento de acidificación de las aguas superficiales, resultante de la emisión de los gases derivados del impacto, como la causa más plausible para explicar las extinciones selectivas en los océanos en el límite K/Pg. Esa acidificación afectaría a los organismos de conchas carbonatadas que habitaban en las aguas superficiales, mientras que la acidez de las aguas no llegaría a los fondos oceánicos. Esta hipótesis dio también respuesta a uno de los mayores enigmas de la Paleontología, la extinción de los ammonites y la supervivencia de los nautiloideos en el límite K/Pg (Alegret, Thomas y Lohmann, 2012).

Tomando las palabras de la propia Laia en su discurso *“Este es por tanto un ejemplo de cómo una hipótesis planteada originalmente desde el campo de la geoquímica para analizar el ciclo del carbono, y adaptada posteriormente a interpretaciones paleontológicas, pudo ser falsada*

gracias al estudio de grupos de organismos que, aparentemente, presentaban poco interés para el estudio de la quinta gran extinción en masa”.

Los resultados obtenidos por Laia y el conjunto de los investigadores con los que ha trabajado, han permitido también interpretar los cambios paleoambientales acaecidos en la región del Golfo de México y el Caribe y en los principales océanos (Atlántico, Tethys, Pacífico y Océano Austral), nutriendo los modelos que permiten entender la respuesta del océano y la atmósfera terrestres ante un evento tan repentino y global como el impacto de un gran asteroide.

Otra aportación destacada, basada en el estudio de foraminíferos bentónicos contenidos en el interior de pistas fósiles del límite Cretácico/Paleógeno, es la relativa al descubrimiento de hiatos previamente no detectados en las sucesiones estratigráficas. Estudiando pistas fósiles que atraviesan el límite Cretácico/Paleógeno, unas anteriores y otras posteriores al límite K/Pg, pudo proponer un escenario post-impacto, caracterizado por un elevado flujo de materia orgánica al fondo marino, donde proliferaron los bulimínidos (un grupo de foraminíferos indicativos de un alto aporte de nutrientes al medio marino), que colonizaron el fondo y fueron posteriormente introducidos en galerías de bioturbación que quedaron preservadas en el registro estratigráfico (Alegret, Rodríguez-Tovar y Uchman, 2015). Se vio que una sección estratigráfica que aparentemente era completa, ya que en ella se habían identificado las principales biozonas de microfósiles marinos, en realidad escondía un pequeño hiato no identificable a través de la bioestratigrafía, y que la única evidencia de dicho hiato se encontraba en el interior de las trazas fósiles. Las implicaciones de este hallazgo son muy relevantes, porque secciones del tránsito K/Pg que se consideraban estratigráficamente completas pueden no serlo, faltando partes del registro que son esenciales para su interpretación. Este trabajo sentó las bases para futuros estudios

que reinterpreten el registro fósil y reevalúen las reconstrucciones paleoambientales tras el impacto del límite K/Pg.

En 2010 publicó en *Science*, junto con otros 40 autores, una excelente síntesis global de las principales evidencias que demuestran la relación causal entre el impacto del asteroide que formó el cráter de Chicxulub (península del Yucatán, México) y las perturbaciones ambientales que provocaron la quinta gran extinción en masa y afectaron intensamente a la vida en nuestro planeta (Schulte et al., 2010).

Otra contribución en la misma revista (Hull et al., 2020) sirvió para zanjar el debate sobre el papel de la intensa actividad volcánica en el área del Decán (India), a finales del Cretácico y principio del Paleógeno, en la quinta gran extinción masiva. Este trabajo presenta la curva de paleotemperatura más detallada que existe para el tránsito Cretácico-Paleógeno, y junto a las estimaciones de la liberación de gases asociada a la principal fase de actividad volcánica, indican que ésta comenzó y acabó significativamente antes del impacto de Yucatán y de las extinciones, siendo posible una segunda fase de desgasificación posterior a las extinciones. El trabajo concluye que únicamente el impacto coincide con la extinción en masa, y con los cambios globales el ciclo de carbono.

Eventos de calentamiento

Una parte importante de la investigación de Laia y su red de colaboradores se ha centrado en los efectos de eventos calentamiento global (hipertermales) sobre la biota marina, incluyendo el mayor de ellos, el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM) y otros eventos menores. En relación con el PETM, analizaron la mayor extinción en masa de foraminíferos bentónicos de los últimos 90 millones de años, concluyendo que la inestabilidad ambiental comenzó antes del límite Paleoceno/Eoceno (por tanto, antes de la liberación

masiva de carbono ligero C¹² al sistema océano-atmósfera). Mostraron que el evento de extinción de los foraminíferos no está relacionado exclusivamente con factores tales como la acidificación de las aguas, baja oxigenación de las mismas, o cambios en la productividad, sino que el único parámetro registrado de forma global, en todas las latitudes y profundidades, es un calentamiento de 4-6° C en los fondos oceánicos. Este calentamiento implicó, en algunos lugares, una intensificación del ciclo hidrológico (Alegret et al., 2009 a, b, 2010; Dunkley-Jones et al., 2018; Arreguín-Rodríguez et al., 2018; Alegret et al., 2021 b).

Una contribución que, a mi juicio, ilustra la creatividad y originalidad del trabajo de la nueva Académica, es la relativa a sus estudios sobre biomarcadores lipídicos en foraminíferos (Arreguín-Rodríguez et al., 2014). Basado en un diseño inicial de Laia en 2011 y posteriormente desarrollado por su doctoranda Gabriela Arreguín-Rodríguez, aborda un problema que afecta a numerosos perfiles del PETM, en los que las muestras de la base del Eoceno no contienen carbonato cálcico debido a la intensa acidificación de los océanos, y tampoco contienen microfósiles de caparazones calcáreos. En esas muestras, Alegret había identificado un género concreto de foraminíferos bentónicos, de unas 100 micras de tamaño, que construyen un caparazón que aglutina partículas del medio con un cemento orgánico. En 2011 había sido invitada como conferenciante al laboratorio de geoquímica orgánica del *Massachusetts Institute of Technology*, y conocía la gran precisión de sus equipos. Ideó un estudio en el que, extrayendo tantos foraminíferos aglutinados como fuera posible, se pudiera contar con una masa crítica de ese cemento orgánico aglutinante que pudiera ser analizado en los laboratorios del MIT. Los resultados fueron muy positivos, y se identificaron biomarcadores de fuentes terrestres que indicaban un aporte de materia orgánica refractaria al fondo marino, ligado a la intensificación del ciclo hidrológico durante el evento de calentamiento del PETM.

Sus investigaciones sobre múltiples eventos hipertermales menores registrados durante el Paleoceno y el Eoceno, han permitido calibrar las consecuencias de estos en función de su magnitud, y del marco climático global (Alegret et al., 2016, 2021 a, b, 2022; Arreguín-Rodríguez et al., 2022). A partir de ellas, han podido diferenciar los hipertermales que se superponen a la tendencia general de calentamiento gradual del Paleoceno y Eoceno inferior, de los que se superponen a la tendencia de enfriamiento registrada a partir del Óptimo Climático del Eoceno inicial. El análisis de las asociaciones de foraminíferos bentónicos en localidades de distribución global, ha servido para analizar su recuperación tras la extinción del PETM y comparar la resiliencia de las especies más abundantes con las de otros hipertermales de menor magnitud, siendo determinante su registro antes o después de la gran extinción del PETM.

Finalmente, en este ámbito, quiero señalar que Laia ha liderado la revisión más completa que existe sobre la evolución del fondo oceánico a lo largo de los últimos 70 millones de años (Alegret et al., 2021 b). En ella se describe como se producen y se propagan cambios globales ligados a eventos de distinta magnitud y rapidez, desde instantáneos como el impacto de un asteroide hasta eventos de calentamiento global que se prolongaron decenas y hasta cientos de miles de años, lo que permite adquirir una cabal perspectiva de la extrema rapidez del actual cambio climático. Para realizar esta revisión, dirigió otro innovador estudio (Arreguín-Rodríguez et al., 2021) en el que se desarrolla un método para integrar escalas temporales que permitan comparar eventos a lo largo del tiempo, o datos de distintas localidades, algo de gran importancia en cualquier reconstrucción de la historia geológica. Para ello, se actualizó la escala magnetobiocronológica del Paleógeno y se desarrolló una aplicación MATLAB que permite representar cualquier tipo de datos asociados a distintas escalas temporales, facilitando así el análisis de la evolución de grupos fósiles a lo largo del tiempo.

El nuevo continente de Zelandia

El hallazgo de un nuevo continente es sin duda algo de gran relevancia para las Ciencias de la Tierra, y parece sorprendente que hasta fecha tan reciente como 2017 no se haya establecido de manera clara su existencia. Desde el primer momento tras su descubrimiento, Laia estuvo implicada en las investigaciones sobre Zelandia. Entre julio y septiembre de 2017 la Dra. Alegret participó en la Expedición 371 del *International Ocean Discovery Program*, la primera que acometió una exploración detallada del nuevo continente. Los datos obtenidos fueron la base de una publicación conjunta (Sutherland et al., 2020), en la que se describe la evolución de Zelandia, y se infieren grandes movimientos verticales a lo largo del tiempo, con momentos en los que estuvo sumergido a miles de metros de profundidad, y otros en los que emergió e incluso hubo tierra firme. Los estudios de Laia sobre foraminíferos fueron críticos para reconstruir la paleobatimetría y los movimientos verticales de este continente a lo largo de 70 millones de años. Los resultados de este trabajo sirvieron para refutar la hipótesis previamente aceptada de que Zelandia había permanecido sumergido bajo el Pacífico desde que se separó de Australia y de la Antártida. Pusieron también de manifiesto como los movimientos de subducción perfilaron la geografía de Zelandia, y permitieron proponer un nuevo modelo de subducción, mejorando el conocimiento sobre este tipo de fenómenos globales, sobre su relación con la tectónica de placas, y sus consecuencias.

Las aportaciones de Laia y su equipo a partir del estudio de foraminíferos bentónicos, han contribuido a la realización de reconstrucciones paleobatimétricas, y han dado lugar a la identificación de una importante subsidencia en regiones de Zelandia, como la Fosa de Nueva Caledonia. En estos trabajos se han identificado unas de las primeras señales de subducción conocidas en el Pacífico Occidental, entre 67 y 60 millones de años antes de la actualidad (Crouch et al., 2022).

Sus trabajos sobre los sondeos de Zelandia también han permitido la identificación de varios eventos hipertermales en ese continente. La incorporación de los datos derivados del estudio de los foraminíferos bentónicos en el seno de los trabajos multidisciplinares que sobre Zelandia se están llevando a cabo, ha contribuido a obtener una comprensión más cabal de estos eventos de calentamiento, así como de la respuesta de los ecosistemas marinos a diferentes factores paleogeográficos o paleoceanográficos (Alegret et al., 2021 a).

Como ha señalado la nueva Académica en su discurso, “...los foraminíferos bentónicos han contribuido a estudios multidisciplinares que analizan fenómenos globales como los procesos de subducción, y han demostrado ser una herramienta excelente para la exploración en geología, trazando la evolución de un continente”. A lo largo de su corta pero intensa trayectoria científica, Laia ha puesto de manifiesto su capacidad para utilizar esa herramienta con maestría y rigor, así como para hacerlo integrándose en equipos internacionales y multidisciplinares, y para liderarlos.

Me parece adecuado cerrar esta respuesta recordando el título del discurso que pronuncié hace exactamente 20 años, con motivo de mi ingreso en esta Academia, y ruego disculpen la autocita: “*De la comprensión de la historia de la tierra al análisis y predicción de las interacciones entre seres humanos y medio natural*”. En ese discurso señalaba que el Principio del Actualismo (que se puede enunciar de forma sintética como: el presente es la clave para entender el pasado) se ha utilizado a lo largo de la historia de las Ciencias Geológicas para interpretar la historia del planeta a partir del estudio del presente, de los procesos actuales y sus efectos. Sin embargo, desde hace unas décadas y cada vez más, se está aplicando lo que podríamos llamar el “Actualismo inverso”: el pasado es la clave para entender el presente e intentar predecir el futuro.

Seguramente no es casual que la nueva Académica haya cerrado su intervención con estas palabras: “*La Micropaleontología, y la*

Paleontología en general, son mucho más que la reconstrucción del pasado de la vida a través del estudio de los fósiles. Son mucho más que analizar la evolución de los organismos desde su origen, los ambientes en los que vivieron y las interacciones entre ellos. No se limitan a estudiar el pasado como algo muerto, sino que permiten conocer la respuesta de nuestro planeta a eventos globales, comprender la vida y los ecosistemas actuales, e incluso predecir las posibles consecuencias del actual cambio climático. Son una ventana que nos permite estudiar el pasado para entender el presente y mirar hacia el futuro”.

Como pueden suponer, no podría estar más de acuerdo con esa afirmación. Bienvenida a la Academia, Laia.

Muchas gracias por su atención.

Referencias

- Alegret L. y Thomas E. (2001). Upper Cretaceous and lower Paleogene benthic foraminifera from northeastern Mexico. *Micropaleontology*, 47 (4): 269-316.
- Alegret L. y Thomas E. (2007). Deep-Sea environments across the Cretaceous/Paleogene boundary in the eastern South Atlantic Ocean (ODP Leg 208, Walvis Ridge). *Marine Micropaleontology*, 64: 1-17.
- Alegret L. y Thomas E. (2009). Food supply to the seafloor in the Pacific Ocean after the Cretaceous/Paleogene boundary event. *Marine Micropaleontology*, 73: 105-116.
- Alegret L., Molina E. y Thomas E. (2001). Benthic foraminifera at the Cretaceous/Tertiary boundary around the Gulf of Mexico. *Geology*, 29 (10): 891-894.
- Alegret L., Molina E. y Thomas E. (2003). Benthic foraminiferal turnover across the Cretaceous/Paleogene boundary at Agost (southeastern Spain): paleoenvironmental inferences. *Marine Micropaleontology*, 48:
- Alegret L., Arenillas I., Arz J. A. Díaz C., Grajales M., Meléndez A., Molina E., Rojas R. y Soria A. (2005). Cretaceous/Paleogene boundary deposits at Loma Capiro, central Cuba: Evidence for the Chicxulub impact. *Geology*, 33(9): 721-724.
- Alegret L., Ortiz S. y Molina E. (2009 a). Extinction and recovery of benthic foraminifera across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Southern Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 279: 186-200.
- Alegret L., Ortiz S., Orue-Etxebarria X., Bernaola G., Baceta J. I., Monechi S., Apellaniz E., Pujalte V. (2009 b). The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: new data from the microfossil turnover at the Zumaia section, Spain. *Palaios*, 24: 318-328.
- Alegret L., Ortiz S., Arenillas, I. y Molina E. (2010). What happens when the ocean is overheated? The foraminiferal response across the

- Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Spain). *Geological Society of America Bulletin*, 122 (9/10): 1616-1624.
- Aleget L., Thomas E. y Lohmann, K C. (2012). End-Cretaceous marine mass extinction not caused by productivity collapse. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (3): 728-732.
- Alegret, L., Rodríguez-Tovar, F. J. y Uchman, A. (2015). How bioturbation obscured the Cretaceous-Paleogene boundary record. *Terra Nova*, 27: 225-230.
- Alegret L., Ortiz S., Arreguín-Rodríguez, G.J., Monechi, S, Millán, I., Molina, E. (2016). Microfossil turnover across the uppermost Danian at Caravaca, Spain: Paleoenvironmental inferences and identification of the latest Danian event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 463: 45-59.
- Alegret, L., Harper, D.T., Agnini, C., Newsham, C., Westerhold, T., Cramwinckel, M. J., Dallanave, E., Dickens, G. R., Sutherland, R. (2021 a). Biotic Response to early Eocene Warming Events: Integrated Record from Offshore Zealandia, north Tasman Sea. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36, e2020PA004179.
- Alegret, L., Arreguín-Rodríguez, G. J., Trasviña-Moreno, C.A. Thomas, E. (2021 b). Turnover and stability in the deep sea: benthic foraminifera as tracers of Paleogene global change. *Global and Planetary Change*, 196 (2021), 103372.
- Alegret, L., Arreguín-Rodríguez, G. J. y Thomas, E. (2022). Oceanic productivity after the Cretaceous/Paleogene impact: where do we stand? The view from the deep. En: Koeberl, C., Claeys, P., Montanari, A., eds., *From the Guajira desert to the Apennines, and from Mediterranean microplates to the Mexican killer asteroid: Honoring the career of Walter Alvarez*. Geological Society of America Special Paper 557, cap. 21: 449-470.
- Arreguín-Rodríguez, G. J., Alegret, L., Sepúlveda, J., Newman, S., Summons, R. E. 2014. Enhanced terrestrial input supporting the

- Glomospira acme across the Paleocene-Eocene boundary in Southern Spain. *Micropaleontology*, 60 (1): 43-51.
- Arreguín-Rodríguez, G. J., Barnet, J., Leng, M., Littler, K., Kroon, D., Schmidt, D., Thomas, E., Alegret, L. (2021). Benthic foraminiferal turnover across the Dan-C2 event in the eastern South Atlantic Ocean (ODP Site 1262). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 572, 110410.
- Arreguín-Rodríguez, G. J., Thomas, E. y Alegret, L. 2022. Some like it cool: Benthic foraminiferal response to Paleogene warming events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 593, 110925.
- Crouch, E. M., Clower, C. D., Raine, J. I., Alegret, L., Cramwinckel, M. J., Sutherland, R. (2022). Latest Cretaceous and Paleocene biostratigraphy and paleogeography of northern Zealandia, IODP Site U1509, New Caledonia Trough, southwest Pacific. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, doi.org/10.1080/00288306.2022.2090386.
- Dunkley Jones, T., Manners, H., Hoggett, M., Kirkland Turner, S., Westerhold, T., Leng, M. J., Pancost, R. D., Ridgwell, A., Alegret, L., Duller, R., Grimes, S. T. (2018). Dynamics of sediment flux to a bathyal continental margin section through the Paleocene– Eocene Thermal Maximum. *Climate of the Past*, 14, 1035-1049.
- Henehan, M., Ridgwell, A., Thomas, E., Zhang, S., Alegret, L., Schmidt, D. N., Rae, J. W. B., Witts, J. D., Landman, N. H., Greene, S., Huber, B. T., Super, J., Planavsky, N. J., Hull, P. M. (2019). Rapid ocean acidification and phased biogeochemical recovery following the end-Cretaceous Chicxulub impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (45): 22500-22504.
- Hull, P., Bornemann, A., Penman, D., Henehan, M. J., Norris, R. D., Wilson, P. A., Blum, P., Alegret, L., Batenburg, S., Bown, P., Bralower, T. J., Cournede, C., Deutsh, A., Donner, B., Friedrich, O., Jehle, S., Kim, H., Kroon, D., Lippert, P., Loroch, D., Moebius, I., Moriya, K., Peppe, D. J., Ravizza, G., Röhl, U., Schueth, J. D., Sepulveda, J., Sexton, P., Sibert,

- E., Sliwinska, K., Summons, R., Thomas, E., Westerhold, T., Whiteside, J., Yamaguchi, T., Zachos, J. C. (2020). On Impact and Volcanism across the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science* 367, 266-272.
- Quevedo y Villegas, F. de (1627). El mundo por de dentro. <https://biblioteca.org.ar/libros/897.pdf>
- Soria A. R., Liesa C. L., Mata M. P., Arz J. A., Alegret L., Arenillas I., Meléndez A. (2001). Slumping and a sandbar deposit at the Cretaceous/Tertiary in the El Tecolote sector (northeastern Mexico): An impact induced sediment gravity flow. *Geology*, 29 (3): 231-234.
- Schulte P., Alegret L., y 39 más. (2010). The Chicxulub Impact and the Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 327: 1214-1218.
- Sutherland, R., Dickens, G. R., Blum, P., Agnini, C., Alegret, L., Asatryan, G., Bhattacharya, J., Bordenave, A., Chang, L., Collot, J., Cramwinckel, M. J., Dallanave, E., Drake, M. K., Etienne, S. J. G., Giorgioni, M., Gurnis, M., Harper, D. T., Huang, H. H. M., Keller, A. L., Lam, A. R., Li, H., Matsui, H., Morgans, H. E. G., Newsam, C., Park, Y. H., Pascher, K. M., Pekar, S. F., Penman, D. E., Saito, S., Stratford, W. R., Westerhold, T., Zhou, X. (2020). Continental-scale geographic change across Zealandia during Paleogene subduction initiation. *Geology*, 48, <https://doi.org/10.1130/G47008.1>