

MICROPALÉONTOLOGÍA

Eustoquio Molina (Editor)

The logo for the publisher, consisting of the letters 'PEU' in a stylized, black, gothic-style font.

COLECCIÓN TEXTOS DOCENTES

MICROPALEONTOLOGÍA

Eustoquio Molina
(Editor)



Prensas Universitarias de Zaragoza

FICHA CATALOGRÁFICA

MICROPALEONTOLOGÍA / Eustoquio Molina (editor). — 2.^a ed. Zaragoza : Prensas Universitarias de Zaragoza, 2004
704 p. : il. ; 24 cm. — (Textos Docentes ; 93)

ISBN 84-7733-744-6

I. Foraminíferos fósiles—Tratados, manuales, etc. I. Molina, Eustoquio. II. Prensas Universitarias de Zaragoza. III. Título. IV. Serie: Textos Docentes (Prensas Universitarias de Zaragoza) ; 93
563.12(075.8)

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, ni su préstamo, alquiler o cualquier forma de cesión de uso del ejemplar, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

- © Eustoquio Molina
- © De la presente edición, Prensas Universitarias de Zaragoza
2.^a edición, 2004

Editado por Prensas Universitarias de Zaragoza
Edificio de Ciencias Geológicas
C/ Pedro Cerbuna, 12
50009 Zaragoza, España

Prensas Universitarias de Zaragoza es la editorial de la Universidad de Zaragoza, que edita e imprime libros desde su fundación en 1542.

Impreso en España
Imprime: LITOCIAN, S.L.
D.L.: Z-3508-2004

Prólogo a la segunda edición

En poco más de un año se ha agotado la primera edición de esta obra, lo que indica el interés y la necesidad que había de un libro de texto de Micropaleontología en español. La tirada era más bien pequeña, pero con tiradas similares nunca hemos agotado ninguno de los libros que hemos editado anteriormente. Otra prueba de la buena acogida y del éxito alcanzado han sido las favorables reseñas realizadas por Náñez (2003) en *Ameghiniana* 40(2), 154 y por Mathieu (2003) en *Revue de Micropaléontologie* 46(3), 191.

Esta segunda edición ha sido revisada y ampliada, ya que un libro de estas características ha de ser revisado para corregir los errores y, sobre todo, para actualizar los contenidos periódicamente. Hemos tratado de recabar críticas de los mejores especialistas que conocemos y hemos recibido una serie de excelentes sugerencias. Esto ha tenido como resultado que hayamos podido mejorar la mayoría de los capítulos y el libro se haya incrementado en 70 páginas, aunque no todos los capítulos se han ampliado y corregido con la misma intensidad. Hemos tratado de mejorar la calidad de muchas figuras, ya que esta ha sido la crítica más fuerte que hemos recibido, pero la pérdida generalizada de contraste en la anterior edición fue un fallo de imprenta que esperamos no se produzca en ésta.

Las sugerencias enviadas por varios colegas y amigos han contribuido a mejorar los distintos capítulos. Por ello, además de a los especialistas citados en el prólogo de la primera edición, algunos de los cuales nos han vuelto a hacer sugerencias, deseamos agradecer su valiosa ayuda en esta edición a los siguientes: Luis E. Cruz, Katica Drobne, Zarela Herrera, Andrea Jiménez, Norberto Malumián, Ignacio Martínez, Carolina Náñez, Mirta Quatrocchio y Carmen Rosales. Además, muy especialmente estamos agradecidos a Cristina González y a Montserrat Truyols Massoni, que han redactado los apartados de microbraquiópodos y tentaculites respectivamente. Sin todos ellos este libro no sería lo que es y, ni que decir tiene, están exonerados de los errores u omisiones que los autores y el editor podamos haber cometido en esta segunda edición.

Eustoquio Molina

Índice

Prólogos.	
<i>Eustoquio Molina</i>	7

I PARTE: FUNDAMENTOS

1. Micropaleontología. Concepto, historia y estado actual	
<i>Eustoquio Molina</i>	13
2. Metodología: muestreos, técnicas de preparación y métodos de estudio	
<i>Concepción Gonzalvo</i>	35
3. Tafonomía: particularidades de la fosilización de los microfósiles	
<i>Eustoquio Molina</i>	53
4. Los microfósiles y la clasificación biológica	
<i>Beatriz Azanza</i>	71

II PARTE: SISTEMÁTICA

5. Foraminíferos: biología, organización de la concha y clasificación	
<i>Ignacio Arenillas</i>	95
6. Foraminíferos planctónicos: Globigerinina	
<i>Eustoquio Molina</i>	127
7. Foraminíferos bentónicos: Lagenina, Involutinina, Robertinina,...	
<i>Laia Alegret</i>	159
8. Foraminíferos bentónicos: Rotaliina	
<i>Ignacio Arenillas</i>	179
9. Foraminíferos bentónicos: Miliolina	
<i>Ignacio Arenillas</i>	207
10. Foraminíferos bentónicos: Fusulinina	
<i>José Antonio Arz</i>	231
11. Foraminíferos bentónicos: Allogromiina y Textulariina	
<i>Silvia Ortiz</i>	249
12. Radiolarios	
<i>José Antonio Arz</i>	273
13. Tintínidos	
<i>José Ignacio Canudo</i>	293
14. Bacterias	
<i>José Antonio Arz</i>	309

15. Cocolitofóridos y otros nanofósiles calcáreos	
<i>Eustoquio Molina</i>	325
16. Diatomeas y silicoflagelados	
<i>José Antonio Arz</i>	341
17. Dinoflagelados, acritarcos y quitinozoos	
<i>Laia Alegret</i>	361
18. Polen y esporas	
<i>José Ignacio Canudo</i>	387
19. Algas calcáreas	
<i>José Ignacio Canudo</i>	405
20. Briozoos	
<i>Laia Alegret</i>	427
21. Ostrácodos	
<i>José Ignacio Canudo</i>	441
22. Otros grupos de microfósiles y de afinidades inciertas	
<i>Eustoquio Molina</i>	461
23. Conodontos	
<i>José Ignacio Canudo</i>	481
24. Otros microfósiles de vertebrados	
<i>Beatriz Azanza</i>	497

III PARTE: APLICACIONES

25. Paleoecología y reconstrucción paleoambiental con microfósiles	
<i>Laia Alegret</i>	523
26. Paleobiogeografía y paleogeografía global con microfósiles	
<i>Ignacio Arenillas</i>	553
27. Bioestratigrafía: limitaciones y ventajas de los microfósiles	
<i>Ignacio Arenillas</i>	571
28. Métodos de correlación estratigráfica con microfósiles	
<i>Ignacio Arenillas</i>	591
29. Evolución. Modalidades y causas de evolución y extinción con microfósiles	
<i>Eustoquio Molina</i>	623
30. Origen de la vida y evolución de la microbiota en el Precámbrico	
<i>José Antonio Arz</i>	647
31. Historia general de la microbiota fanerozoica. Microfacies	
<i>José Antonio Arz</i>	669
32. Diccionario de términos micropaleontológicos	
<i>Eustoquio Molina</i>	689

Capítulo 1

Micropaleontología. Concepto, historia y estado actual

Eustoquio Molina

1.1. Concepto

La Micropaleontología es la disciplina que estudia la vida del pasado y la evolución de la biosfera a partir de los fósiles de pequeño tamaño, para lo cual se emplean técnicas especiales de muestreo, preparación y observación con el microscopio. Se trata de una especialización relativamente reciente de la Paleontología que se define principalmente por razones de índole técnica y práctica, ya que los principios científicos son los mismos (Brönnimann, 1965). Tradicionalmente lo que más ha caracterizado y unificado a la Micropaleontología ha sido su valiosa aplicación a la resolución de problemas geológicos (Lipps, 1981). Esto ha sido debido a la gran utilidad bioestratigráfica de los microfósiles, ya que presentan numerosas ventajas por su pequeño tamaño, gran abundancia y amplia distribución.

Cuando se intenta delimitar la Micropaleontología se percibe que no tiene fronteras bien trazadas, pues realmente el microscopio se utiliza también para la observación de detalles estructurales en el estudio de los fósiles más grandes. Además, la separación de los organismos en macro y microfósiles es a veces bastante arbitraria. Se suelen denominar nanofósiles a los de tamaño inferior a 63 μm , y microfósiles al resto, que no suelen sobrepasar 1 mm. Generalmente, se suelen estudiar y considerar como microfósiles todos aquellos restos de organismos que se encuentran en las preparaciones micropaleontológicas: lámina delgada, frotis, levigado, etc. Algunos de esos restos son fragmentos de metazoos cuya inclusión en la Micropaleontología es problemática, ya que con frecuencia son partes de organismos de mayor tamaño que son objeto de estudio de la Paleobotánica, Paleontología de invertebrados y Paleontología de vertebrados. Sin embargo, otros como las algas calcáreas, el polen y esporas y los conodontos se consideran generalmente microfósiles.

Ahora bien, entre los metazoos existen grupos de pequeño tamaño que son normalmente incluidos en la Micropaleontología. Entre éstos se encuentran los ostrácodos, pterópodos, etc. Sin embargo, otros grupos tales como los briozoos, y

especialmente los micromamíferos, han sido incluidos menos frecuentemente. Pero los microfósiles más típicos son los organismos unicelulares procariotas y protistas; tanto los más primitivos: bacterias, cianofíceas y flagelados, como los más evolucionados: rizoflagelados, actinópodos y ciliados. Dentro de los cuales los grupos más estudiados son los dinoflagelados, silicoflagelados, diatomeas, coccolitofóridos, tintínidos, radiolarios y especialmente los foraminíferos.

Cuando se establece una división de los organismos fósiles atendiendo principalmente a criterios taxonómicos, la Paleobotánica, Paleontología de invertebrados y Paleontología de vertebrados, constituyen la base y núcleo de la ciencia paleontológica (fig. 1.1). Ahora bien, la Micropaleontología, por razones técnicas y mayor carácter aplicado, ha mantenido cierta autonomía y relevancia.

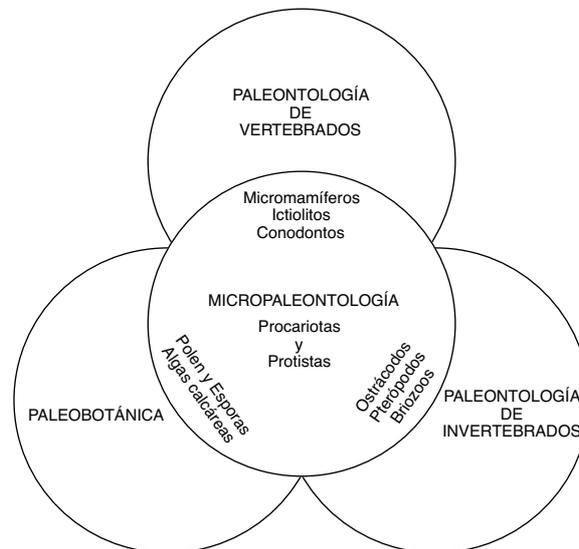


FIGURA 1.1. Grupos de organismos estudiados por la Micropaleontología y relación con otras disciplinas paleontológicas.

La Micropaleontología, al ser una disciplina paleontológica, aporta datos muy interesantes, principalmente de tipo evolutivo, paleoecológico y bioestratigráfico. Ahora bien, tradicionalmente ha sido el aspecto utilitario de los microfósiles en la industria petrolífera, lo que ha desarrollado en gran medida las aplicaciones bioestratigráficas, basadas en una taxonomía no siempre rigurosa. Pero en la actualidad, el mayor estudio de la Micropaleontología en las universidades y otros centros de investigación, está desarrollando los aspectos teóricos y aportando una mayor base conceptual, al considerar más conscientemente los aspectos tafonómicos y paleobiológicos (Molina, 1995, 1998).

Los grupos estudiados por los micropaleontólogos son muy numerosos, variados y tienen una amplia distribución en el espacio y en el tiempo (fig. 1.2).

<i>Microfósil</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Composición</i>	<i>Hábitat</i>	<i>Distribución vertical</i>
<i>Archaeobacterias</i>	unicelulares	<0,01 mm	orgánica	marino	Arcaico-Actual
<i>Eubacterias</i>	unicel. filament.	<0,01 mm	orgánica	todos	Arcaico-Actual
<i>Cianobacterias</i>	unicel. filament.	<0,05 mm	orgánica	marino	Arcaico-Actual
<i>Rodofitas</i>	talo	<0,1 mm	orgánica	todos	Precámbrico-Actual
<i>Clorofitas</i>	talo	0,1-0,4 mm	silíc., calcit, etc.	todos	Precámbrico-Actual
<i>Carofitas</i>	talo, girogonitos	0,2-3 mm	calcita	acuático	Silúrico-Actual
<i>Hongos</i>	cocoid. filament.	<0,01 mm	orgán. calcita	todos	Precámbrico-Actual
<i>Polen</i>	gránulos	<0,15 mm	esporopolenina	continental	Devónico-Actual
<i>Esporas</i>	esferoidal	0,001-0,9 mm	esporopolenina	continental	Silúrico-Actual
<i>Prasinofitas</i>	quistes	<0,8 mm	orgánica	acuático	Protezoico-Actual
<i>Euglenofitas</i>	unicelulares	<0,2 mm	orgánica	acuático	Jurásico-Actual
<i>Dinoflagelados</i>	quistes	0,05-0,15 mm	orgánica	acuático	Silúrico-Actual
<i>Acritarcos</i>	quistes	<0,1 mm	orgánica	marino	Protezoico-Actual
<i>Ebridinos</i>	malla sólida	<0,1 mm	silicea	marino	Paleoceno-Actual
<i>Diatomeas</i>	valvas	<0,2 mm	silicea	acuático	Jurásico-Actual
<i>Crisomonadinos</i>	quistes	<0,1 mm	silicea	acuático	Precám? Cret. -Act.
<i>Silicoflagelados</i>	malla hueca	<0,1 mm	silicea	marino	Cretácico-Actual
<i>Cocolitofóridos</i>	placas, estrellas	<0,05 mm	calcita	marino	Triásico-Actual
<i>Quitinozoos</i>	uniloculares	0,075-0,7 mm	quitina	marino	Precám. Ord. Dev.
<i>Tecamebinos</i>	unilocular	0,01-0,5 mm	orgánica-aglut.	acuático	Carb. Tercia.Act.
<i>Foraminíferos</i>	concha	0,01-100 mm	org., aglu., carb.	marino	Cámbrico-Actual
<i>Radiolarios</i>	celosía	0,03-1,5 mm	silicea	marino	Cámbrico-Actual
<i>Acantarios</i>	espículas	<0,05 mm	sulfato Sr.	marino	Eoceno-Actual
<i>Heliozoos</i>	espinas	<0,05 mm	silicea	acuático	Pleistoceno-Actual
<i>Tintinomorfos</i>	uniloculares	<0,3 mm	org. aglu. carb.	marino	Ordovícico-Actual
<i>Heterotricos</i>	quistes	<0,3 mm	orgánica	acuático	Cretácico, Cuatern.
<i>Hipotricos</i>	quistes	<0,3 mm	orgánica	acuático	Eoceno-Actual
<i>Poríferos</i>	espículas	0,05-3 mm	silicea, carb.	acuático	Cámbrico-Actual
<i>Melanoescleritos</i>	barras	<2 mm	quitina	marino	Ordovícico-Devón.
<i>Octocoralarios</i>	espículas	1-3 mm	carbonatada	marino	Silúrico?-Actual
<i>Holotúridos</i>	escleritos	0,05-1 mm	carbonatada	marino	Ordovícico-Actual
<i>Briozoos</i>	colonias	0,1-10 cm	org. carb.	acuático	Ordovícico-Actual
<i>Pterópodos</i>	univalvos	0,1-5 mm	carbonatada	marino	Cretácico-Actual
<i>Ostrácodos</i>	bivalvos	0,1-5 mm	carbonatada	acuático	Cámbrico-Actual
<i>Concostráceos</i>	bivalvos	1-5 mm	org. -carb.	acuático	Cámbrico-Actual
<i>Estatolitos</i>	esférica	0,3-0,5 mm	quit.-carb.	marino	Terciario-Actual
<i>Escolecodontos</i>	mandíbulas	0,05-5 mm	quitina	marino	Cámbrico-Actual
<i>Conodontos</i>	dentiformes	0,1-3 mm	fosfatada	marino	Cámbrico-Actual
<i>Ascídias</i>	espículas	0,1 mm	carbonatada	marino	Jurásico-Actual
<i>Ictiolitos</i>	dientes, otolitos	0,05-3 mm	fosfatada	acuático	Silúrico-Actual
<i>Micromamíferos</i>	dientes	0,5-3 mm	fosfatada	continental	Cretácico-Actual

FIGURA 1.2. Grupos de organismos fósiles que han sido estudiados por los micropaleontólogos. Modificado de Lipps (1981, 1993).

La Micropaleontología ha llegado a ser la disciplina paleontológica más estudiada, como lo demuestra el gran número de publicaciones realizadas y de

especialistas en distintos grupos de microfósiles. El grupo de los foraminíferos es el que cuenta con más especialistas, seguido por otros grupos también micropaleontológicos, tales como ostrácodos, polen y esporas, lo cual se aprecia al consultar bibliografía y cualquier directorio reciente de paleontólogos (fig. 1.3).

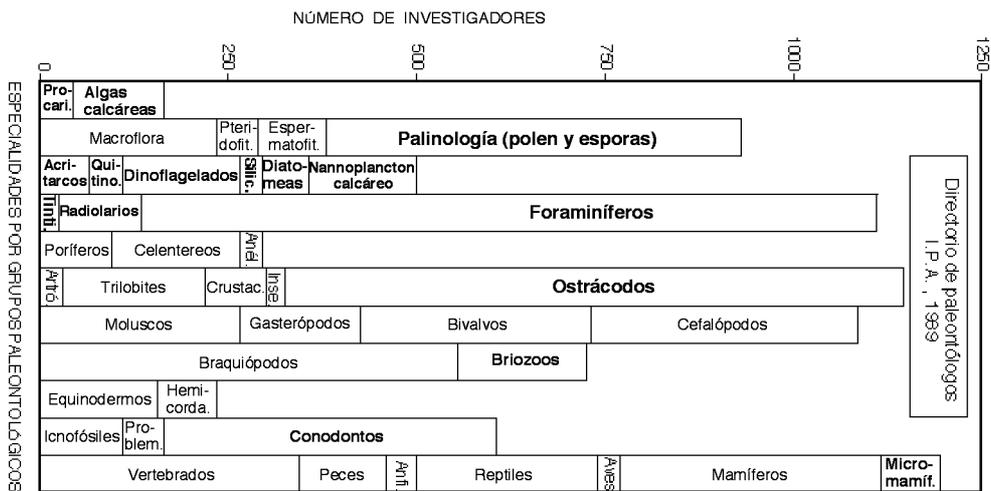


FIGURA 1.3. Número de investigadores especialistas en los distintos grupos paleontológicos según la especialidad declarada en el directorio de paleontólogos del mundo publicado por la IPA en 1989. En negrita se indican los principales grupos objeto de estudio de la Micropaleontología.

1.2. Historia

1.2.1. Nacimiento de la Micropaleontología

Debido al tamaño relativamente grande de algunos microfósiles que son visibles a simple vista, éstos fueron ya conocidos desde antiguo y por lo general incorrectamente interpretados. La primeras menciones de que se tiene constancia se atribuyen a Herodoto (siglo V a. C.) y Plinio (23-79), a quienes se les asocia con la leyenda de que los *Nummulites* eran lentejas petrificadas, procedentes de los restos de comida de los obreros que construyeron las pirámides. Sin embargo, Estrabón (54 a. C.-24 d. C.) argumentó que esta interpretación era probablemente errónea, ya que con frecuencia aparecían en otros lugares. La escuela aristotélica tuvo generalmente ideas equivocadas sobre la naturaleza de los fósiles, que fueron difundidas en los ambientes culturales de la Edad Media. Así, los *Nummulites* y otros grandes foraminíferos fueron incorrectamente interpretados como monedas petrificadas u otros objetos, ideas que han perdurado durante mucho tiempo. Pero

algunos naturalistas reconocieron su naturaleza orgánica y los atribuyeron a diferentes grupos de macrofósiles.

Un acontecimiento fundamental para el nacimiento de la Micropaleontología fue la invención del microscopio por el mercader Van Leeuwenhoek a mediados del siglo XVII, lo cual permitió a Hooke, en su obra *Micrographia* de 1665, describir e ilustrar un microforaminífero, afirmando que se trataba de un pequeño caracol acuático petrificado, que más tarde sería denominado *Ammonia beccarii* por Linneo (fig. 1.4). Durante siglo y medio continuaron estas observaciones, principalmente de foraminíferos, siendo atribuidos a pequeños moluscos, corales, gusanos y otros animales. El mismo Leeuwenhoek figuró otro foraminífero en 1700 que encontró al observar estómagos de gambas. Hay que destacar las observaciones y descripciones durante el siglo XVIII, principalmente en arenas de playas, de Gualteri, Soldani, Beccari, Bianchi y Ledermüller. Algunos de los microfósiles figurados por estos naturalistas, recibieron formalmente nomenclatura binomial en la 12ª edición (1766-1767) de la obra *Systema Naturae* de Linneo.

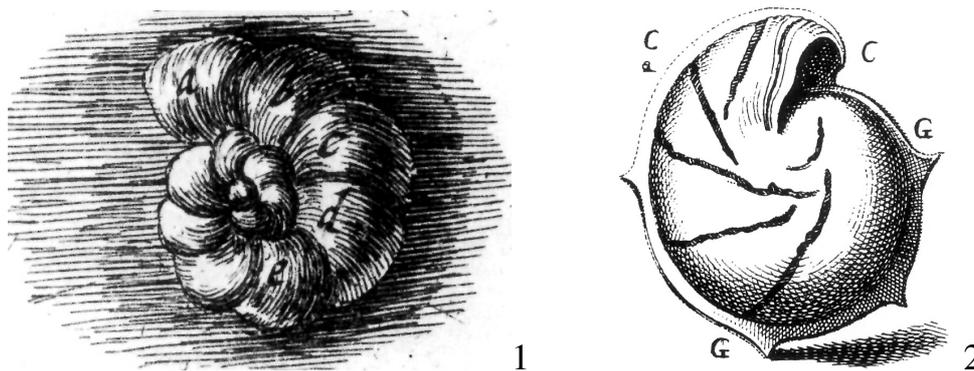


FIGURA 1.4. Primeras ilustraciones de foraminíferos; 1: Dibujo de Hooke que constituye la primera ilustración de un foraminífero en 1665, que atribuyó a un caracol acuático petrificado, y después fue denominado *Ammonia beccarii* por Linneo. 2: Dibujo de Gualteri ilustrando un foraminífero que en 1742 atribuyó a *Nautilus*, sobre el cual Linneo basó su especie *Nautilus calcar* en 1758, actualmente considerada del género *Lenticulina*. Modificado de Cifelli y Richardson (1990).

La labor de estos naturalistas europeos fue continuada por otros famosos a lo largo del siglo XIX. Así, Lamarck (1812) definió algunos géneros con nombres que hoy todavía se usan. Pero el que más destacó en el estudio de los microorganismos fue el francés Alcide d'Orbigny (1802-1857), quien es ahora generalmente considerado como el principal fundador de la Micropaleontología. Entre 1826 y 1857 publicó numerosos trabajos de tipo naturalista sobre distintos grupos de organismos, sobresaliendo los realizados sobre la morfología, distribución y clasificación de los foraminíferos; tanto actuales recogidos en su viaje por América meridional, Cuba y las islas Canarias (1839), como fósiles de la cuenca de Viena

(1846). Creó el término «foraminíferos» que inicialmente consideró como cefalópodos, hasta que Dujardin en 1835 señaló la verdadera naturaleza unicelular y acuñó el término *Rhizopoda*. D'Orbigny describió algunos miles de especies y puso de manifiesto su potencial valor bioestratigráfico. Lamentablemente, fue injustamente acusado de definir demasiadas especies, siendo atacado y ridiculizado por los paleontólogos ingleses. Sin embargo, mucha razón tenían los evolucionistas cuando le atacaban debido a su catastrofismo y teoría de las creaciones sucesivas, que entrañaba una concepción de un fijismo muy dogmático. D'Orbigny proclamaba la existencia de catástrofes absolutas (extinciones totales) y repetidas, que habrían devastado la Tierra en cerca de treinta ocasiones. Después de cada catástrofe de extinción masiva los organismos serían creados todos a la vez en toda la superficie de la Tierra.

El principio del uniformismo y actualismo emitido por Hutton en 1795 fue difundido treinta años después por Lyell, provocando una gran controversia que hacia 1840 se decantó en contra del catastrofismo y con ello se inició el desarrollo de la Geología moderna. Poco después la propuesta de la teoría de la evolución por Darwin (1859) aportó una nueva forma de interpretar y organizar los taxones, pero ni Darwin ni sus contemporáneos naturalistas supieron apreciar la importancia de los microorganismos en los estudios evolutivos, ya que ignoraron la complejidad estructural y la diversidad de hábitats a los que están adaptados.

Durante el siglo XIX predominó la labor taxonómica, la cual produjo la descripción de numerosas especies y se describieron por primera vez otros microfósiles diferentes de los foraminíferos; Pander en 1856 realizó las primeras descripciones detalladas de los conodontos, Sars en 1866 estableció una taxonomía básica sobre ostrácodos, Schmidt en 1875 publicó un relevante atlas sobre diatomeas y Rüst en 1885 describió por primera vez los tintínidos.

Los estudios de d'Orbigny fueron continuados en Austria por Reuss, geólogo y paleontólogo, que trabajó sobre los ostrácodos y los foraminíferos. Reuss en 1862 propuso 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, entre los que destacan un catálogo de foraminíferos actuales (1865), una monografía sobre los foraminíferos del Carbonífero y Pérmico (1876) y especialmente el informe sobre los foraminíferos dragados en la expedición *Challenger* (fig. 1.5). Pero sus ideas sobre la exagerada variabilidad de los microfósiles retrasaron el desarrollo de la aplicación estratigráfica. Asimismo, Haeckel (1887), en su informe sobre los radiolarios del *Challenger*, oscureció la validez bioestratigráfica de estos microfósiles durante mucho tiempo, ya que consideró todos los radiolarios que estudió como actuales, aunque muchos de ellos eran fósiles hasta del Cretácico. Sin embargo, su taxonomía es aún válida para las grandes subdivisiones.

El estudio de los microfósiles con la técnica de la lámina delgada de las rocas que los contienen lo realizó por primera vez Sorby en 1849, pero muy posteriormente fue Cuvillier (1899-1969) quien definió el concepto de microfácies y desde 1945 acometió su examen metódico.

El perfeccionamiento de los microscopios ópticos en el siglo XIX permitió el estudio de los grupos de menor tamaño como los palinomorfos y los nanofósiles. Así, el alemán Goeppert pudo dibujar y describir por primera vez polen y esporas fósiles, y Reinsch publicar en 1884 la primera fotografía de una espora fósil. Otro alemán, Ehrenberg, fue el primero en descubrir los cocolitos en 1836 y describir otros muchos nanofósiles calcáreos, silíceos y orgánicos. Además, estudió otros grupos de microfósiles y fue considerado uno de los fundadores de la Micropaleontología. Ehrenberg fue el primero en separar la Micropaleontología de otras disciplinas, utilizando el término «Microgeología» como título de su libro publicado en 1854, con un contenido similar al que tiene hoy la Micropaleontología. Tardó catorce años en preparar dicho libro, publicado en dos volúmenes y meticulosamente ilustrado con dibujos manuales de numerosos nano y microfósiles. Sin embargo, el término micropaleontología todavía no se utilizaba, ya que fue usado por primera vez por Ford en 1883 en el título de un trabajo sobre briozoos de Canadá.

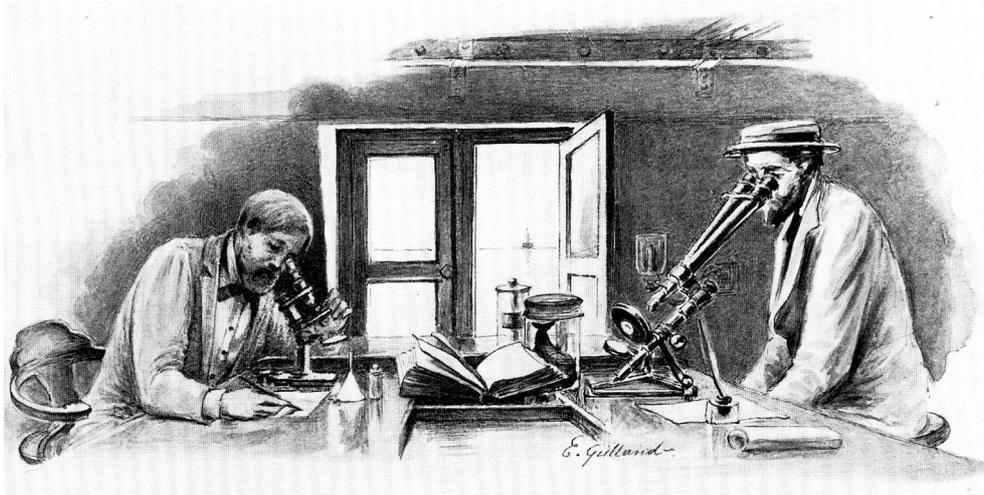


FIGURA 1.5. Dos investigadores trabajando con primitivos microscopios ópticos a bordo del Challenger.

Los nanofósiles fueron observados por otros naturalistas como Huxley, que los denominó cocolitos, pero al igual que Ehrenberg creía que eran concreciones inorgánicas. Poco después, en 1861, Wallich los encontró agrupados formando pequeñas esferas que denominó cocoesferas, afirmó que eran de origen orgánico y especuló sobre si se trataba de larvas de foraminíferos planctónicos. Sin embargo,

Sorby en 1861 dudaba de que fueran foraminíferos y creía que se trataba de otro tipo de organismos. Las muestras dragadas en la expedición del *Challenger* (fig. 1.5) en 1872-1875 suministraron abundantes nanofósiles, se encontraron cocoesferas en las aguas superficiales y se describieron diferentes morfotipos. Pero la biología de los cocolitofóridos fue enigmática hasta principios del siglo XX, en que Lohmann acuñó el término nanoplancton y otros investigadores realizaron los primeros estudios exhaustivos, describiendo muchas especies actuales y algunas fósiles.

La utilidad estratigráfica de los microfósiles se comenzó a poner de manifiesto en el siglo XIX, además de por d'Orbigny, por Brongniart (1823) que utilizó los *Nummulites* y por Forbes (1850) que propuso una zonación basada en ostrácodos. Sin embargo, la aplicación de los foraminíferos en bioestratigrafía fue infravalorada por los integrantes de la llamada Escuela inglesa (Brady, Williamson, Parker, Jones, Carpenter) que propugnaban que los foraminíferos poseían una variación intraespecífica tan grande que era muy difícil diferenciar especies con criterios claros. Ahora bien, fue con el estudio de los foraminíferos en los testigos de sondeos cuando dicha aplicación comenzó a ser importante. Los pioneros en la aplicación del estudio de los microfósiles a los sondeos fueron Dames y Bornemann (1874), que dataron como Turoniense una formación sondeada en Alemania, y Karrer (1877), que determinó que pertenecían al Mioceno las rocas atravesadas, en sondeos hidrogeológicos, en la región de Viena. Pero el primero en aplicar la investigación micropaleontológica a la prospección petrolífera fue Grzybowski (1897), quien estudió en Polonia diversas muestras de un sondeo, estableciendo varias zonas y horizontes, demostrando así que el análisis de la microfauna podía ser muy valioso para la industria del petróleo; sin embargo, su trabajo pasó desapercibido por estar escrito en polaco. Su obra ha vuelto a ser recientemente divulgada en inglés en un libro editado por Kaminski *et al.*, eds. (1993).

1.2.2. Desarrollo de la Micropaleontología

La Micropaleontología nació en Europa, pero fue en América donde tuvo un desarrollo más espectacular, debido a la aplicación de los microfósiles a la datación y correlación de los sondeos petrolíferos. Los paleontólogos rusos fueron conscientes de la utilidad de los foraminíferos y comenzaron a utilizarlos en los campos petrolíferos de Bakú. En EE. UU. Chapman estudió en 1900 los foraminíferos de un sondeo en California, tratándose del primer informe en América sobre microfósiles procedentes de una perforación petrolífera. Con ello nació lo que se denominó Micropaleontología «comercial».

El más importante de los pioneros en EE. UU. fue Cushman, que comenzó sus estudios en Botánica pero pronto cambió y realizó su tesis doctoral en

foraminíferos, finalizándola en 1905. Su dedicación al estudio de este grupo, sobre el que se concentró, publicando importantes artículos y libros, es la razón por la que se le puede considerar el primer especialista propiamente denominado micropaleontólogo. Otro pionero fue Udden, de Augustana College (Illinois), quien en 1911 comenzó a utilizar los microfósiles para correlacionar sondeos de agua y después aplicó las mismas técnicas para correlacionar sondeos de petróleo. Los trabajos de Cushman y la actividad de Udden, quien dirigió la Agencia de Geología Económica de Texas, sirvieron para formar los primeros especialistas y convencer a las empresas y universidades del interés de los microfósiles.

Con la intensificación de la prospección petrolífera en EE. UU. a partir de la primera guerra mundial, la Micropaleontología se desarrolló de tal forma que las compañías petroleras contrataron especialistas y crearon sus propios laboratorios. En este sentido, en 1920 la compañía petrolera Humble y Río Bravo constituyó el primer laboratorio de Micropaleontología aplicada, a cargo de tres investigadores. Asimismo, trabajando para el Servicio Geológico de EE. UU., Cushman creó en Sharon (Massachusetts), en 1923, el famoso laboratorio para la investigación de foraminíferos que lleva su nombre. Además, dos años más tarde inició la publicación de su propia revista: *Contributions from the Cushman Laboratory for Foraminiferal Research*, que fue la primera dedicada exclusivamente a la Micropaleontología, disciplina que por aquellos tiempos estaba prácticamente restringida a los foraminíferos. Posteriormente, publicó un voluminoso libro sobre la clasificación de los foraminíferos y su utilidad económica (Cushman, 1940, 1948, 1955).

Las universidades se dedicaron a formar especialistas, inicialmente dentro de los cursos de Paleontología, y a partir de 1923 como disciplina separada, naciendo así la Micropaleontología académica. El primer curso formal de Micropaleontología fue impartido por Galloway en la Universidad de Columbia, enseñando ostrácodos y briozoos junto a los foraminíferos, y publicando un manual de foraminíferos en 1933. Al mismo tiempo, otro curso se comenzó a impartir en la Universidad de Stanford en 1924 por Schenck, quien impulsó además una pequeña revista, *Micropaleontology Bulletin*, publicada de 1926 a 1933. De este modo se formaron numerosos especialistas; algunos se dedicaron a la enseñanza e investigación en las universidades, pero la mayor parte fueron contratados por las empresas, desempeñando una actividad aplicada al servicio de la Geología.

Algo similar ocurrió en los países industrializados a partir de 1925: se desarrollaron los aspectos taxonómicos, estudiándose otros grupos de microfósiles además de los foraminíferos, y se aplicaron las investigaciones a la resolución de problemas geológicos. El desarrollo a nivel mundial fue más lento y tardío que en EE. UU., pero surgieron una serie de investigadores cuya enumeración sería muy extensa (fig.1.6). Entre algunos trabajos que relatan cómo se produjo el desarrollo de la Micropaleontología podemos citar los de Croneis (1941) y Cifelli y

Richardson (1990) en EE.UU, Staesche (1950) en Alemania y Menner (1950) en Rusia.

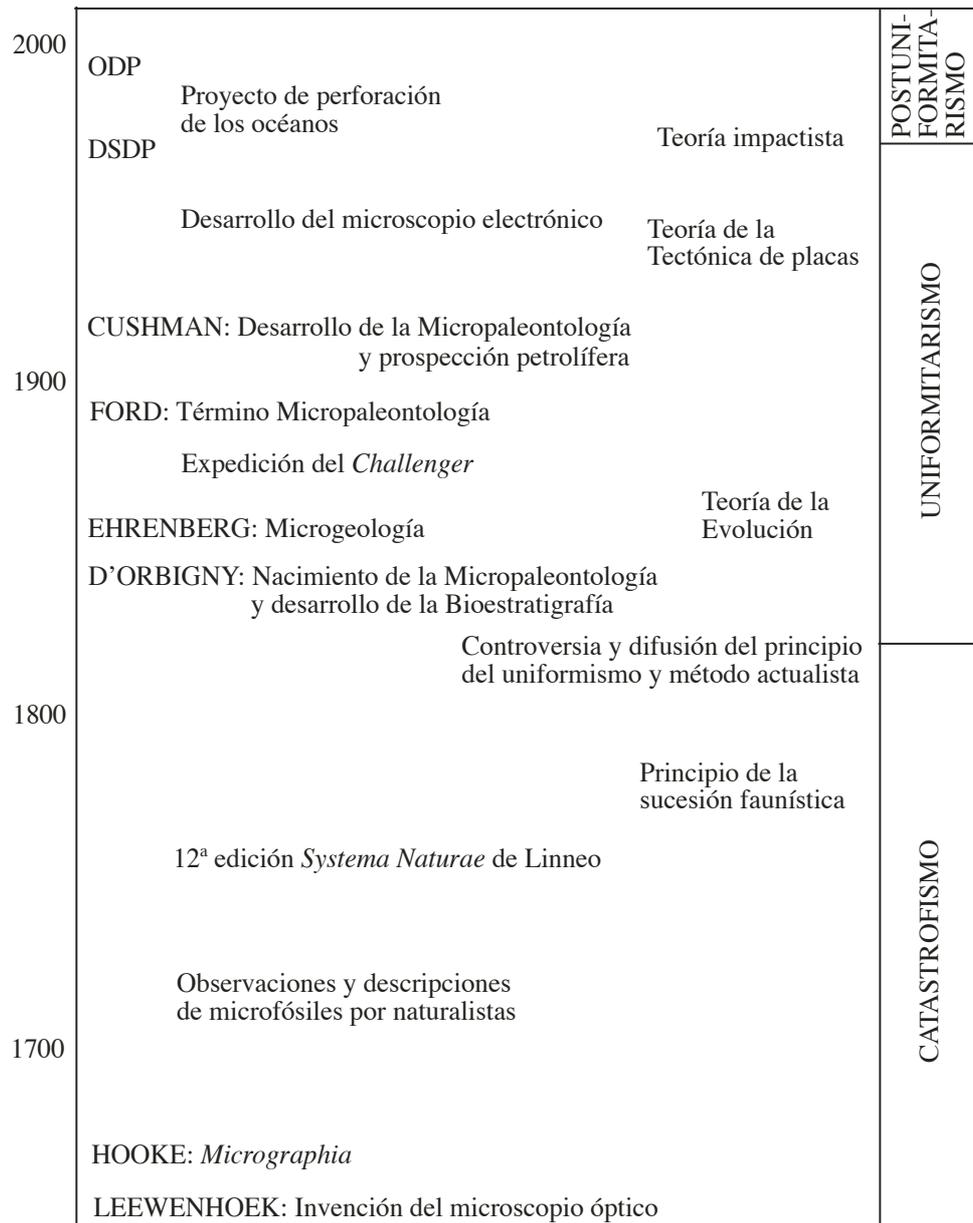


FIGURA 1.6. Hitos principales de la historia de la Micropaleontología en el contexto de las ciencias geológicas y biológicas.

1.2.3. La Micropaleontología en Hispanoamérica

La Micropaleontología en Hispanoamérica se inició en los servicios geológicos y en las universidades a comienzos del siglo XX, paralelamente al desarrollo de Micropaleontología en el resto del mundo, debido a las necesidades de la exploración petrolífera. Muchos de los primeros estudios realizados por compañías petroleras en Colombia, Cuba, Ecuador, México, Perú y Venezuela fueron llevados a cabo por extranjeros, incluyendo a Bolli, Brönnimann, Cole, Cushman, Kniker, Nuttall, Palmer, Stainforth, Todd, Van der Hammen, etc., y muchos de los microfósiles de estos estudios fueron depositados en EE. UU. En los países petroleros existieron micropaleontólogos que acaparaban el trabajo de las empresas petroleras y no formaron discípulos. Esto quizás explique la paradoja de que los países más petroleros actualmente tengan menos micropaleontólogos.

En Venezuela destacan Rivero, del Departamento de Geología de la Universidad Central de Venezuela, y Bermúdez, del Laboratorio de Micropaleontología de la Dirección de Geología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos, que publicaron un tratado de *Micropaleontología General* que fue impreso en España en 1963. Este libro, dirigido a todos los países de habla hispana, tuvo su inspiración en unos apuntes repartidos por Bermúdez entre sus alumnos cuando, con la venia de la Creole Petroleum Corporation, dirigía en 1950-51 el curso de Micropaleontología en la Universidad Central de Venezuela. Debido a que los coautores vivían en ciudades muy distantes, resolvieron que Rivero se encargaría de la preparación del texto general y Bermúdez del de foraminíferos, que finalmente unificaron. Contaron con la ayuda de Royo y Gómez, español exiliado que trabajó en Venezuela y Colombia, quien leyó y criticó muchos capítulos del manuscrito y les ayudó a encontrar términos castellanos, ya que se trataba del primer tratado de Micropaleontología en español. Bermúdez (1905-1979) era un farmacéutico que nació en Cuba, y asesorado por Cushman y Palmer, se especializó en foraminíferos realizando en Cuba sus primeras investigaciones hasta la época de la revolución castrista. Publicó relevantes investigaciones sobre Cuba, Panamá, Costa Rica y Guatemala, por lo que puede ser considerado como el más relevante de los micropaleontólogos nativos hispanoamericanos.

En México bastantes especialistas han realizado su labor en la compañía estatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) y en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), por lo que el desarrollo de la industria petrolera condicionó el rumbo de la Micropaleontología en este país. En este sentido, tres mujeres, Robles Ramos, Cuevas de Sansores y Flores Covarrubias fueron las fundadoras del Laboratorio de Micropaleontología de PEMEX, trabajando principalmente sobre foraminíferos bentónicos y publicando útiles catálogos ilustrados de los foraminíferos planctónicos utilizados en la zonación de Bolli y de los foraminíferos bentónicos del sureste de México. Por otro lado, dentro de los especialistas más destacados

también se encuentra Bonet, profesor exiliado español, que trabajó en los medios académicos y en el IMP, estudiando las calizas cretácicas con gran énfasis en calcisferúlidos y orbitolínidos. También, cabe mencionar a Trejo, cuyo trabajo en nannocónidos es ampliamente reconocido por haber confirmado la hipótesis de Colom de que eran cocolitofóridos. Además, en los ambientes universitarios, dos biólogos son pilares del desarrollo de la Micropaleontología mexicana: Ayala Castañares y Segura Vernis, enseñando y publicando principalmente sobre foraminíferos del Cretácico hasta la actualidad.

En Chile se enseñaba la Micropaleontología en la Universidad de Santiago, para lo que se realizó en 1960 una publicación de uso interno del compendio de Douglass, *Introducción al estudio de los Microfósiles*. El primer chileno que estudió los foraminíferos cenozoicos de la cuenca de Magallanes fue Cañón. Sin embargo, la labor chilena en Micropaleontología tuvo más desarrollo en torno al laboratorio de ENAP, en Punta Arenas, de carácter petrolero, que en 1974 dio lugar al trabajo de Natland y otros sobre un sistema de pisos para la cuenca de Magallanes.

El país que cuenta con más micropaleontólogos en la actualidad es Argentina. La empresa YPF, nacida del Servicio Geológico, que fue el que descubrió petróleo en Argentina, contrató micropaleontólogos muy tardíamente. Una de las primeras ilustraciones de microfósiles en América del Sur, de carofitas y ostrácodos de agua dulce, fue realizada en 1919 por Wichmann, geólogo alemán como todos los primeros geólogos del Servicio Geológico, que falleció en Argentina en 1930. Uno de los primeros micropaleontólogos realmente hispanoamericano fue Frenguelli, médico que nunca ejerció la medicina, decano de la Facultad de La Plata y extraordinario dibujante. Frenguelli se dedicó a las diatomeas y a los silicoflagelados (1940), siendo el primero en situar sistemáticamente a estos últimos. El primer trabajo sistemático sobre foraminíferos en Argentina, con ilustraciones y descripciones, fue realizado por Camacho. Perteneció al Servicio Geológico y fue quien, impartiendo cursos, generó realmente una escuela de relevantes micropaleontólogos, incluyendo a Bertels, que se especializaría en foraminíferos y ostrácodos. La palinología está hoy muy desarrollada debido en gran parte a Menéndez, del Museo Argentino de Ciencias Naturales, quien formó a los primeros palinólogos ya que impartió cursos de palinología durante varios años en la Universidad de Buenos Aires.

Ahora bien, el más famoso de los micropaleontólogos argentinos fue Boltovskoy, que nació en Rusia en 1912 y falleció en Argentina en 1997. Fue profesor en la Universidad de Rostov y micropaleontólogo en un instituto de Viena (1944-45) y, desde 1948, desarrolló su labor como investigador exclusivamente en el Museo Argentino de Ciencias Naturales de Buenos Aires. Se especializó en foraminíferos, principalmente actuales, y realizó algunos trabajos sobre las tecamebas. En 1956 publicó un *Diccionario foraminiferológico plurilingüe* que en

1963 fue corregido y ampliado a todo el plancton marino. En 1965 publicó el libro titulado: *Los Foraminíferos recientes*, destinado a los interesados en la Oceanografía y en la Micropaleontología, el cual fue revisado y traducido al inglés (Boltovskoy y Wright, 1976). Aparte de sus numerosas publicaciones, su gran mérito es la colección de microfósiles que dejó en el museo. Además, impartió numerosos cursos de postgrado en Argentina, Chile, Ecuador y Colombia, despertando gran interés por la Micropaleontología también entre sus hijos, los cuales se han especializado en radiolarios y dinoflagelados.

1.2.4. La Micropaleontología en España

Entre las referencias más antiguas a microfósiles se encuentra la del padre Torrubia, quien en 1754 publicó una obra en la que figuraban una serie de fósiles, entre los que incluía nummúlidos, que consideraba huevos de peces, y recurría aún a la idea del diluvio para explicar su presencia en tierras interiores. Algunas décadas más tarde, Cavanilles ya no recurre a dicha explicación, y en su libro sobre la historia natural del Reino de Valencia (1795-1797) figuran lo que él llama «piedras lenticulares» y «piedras numularias» que debían ser respectivamente *Orbitolina* o *Nummulites* y *Assilina*.

Ahora bien, la introducción de la Micropaleontología en España se inicia en la segunda mitad del siglo XIX, cuando algunos investigadores extranjeros, principalmente franceses, en sus trabajos sobre nuestro país señalan y describen microfósiles (Molina, 1982, 1995, 1998). Uno de los pioneros fue Veneuil, quien hacia mediados de siglo publicó varios trabajos en los que citaba especies de macroforaminíferos. Simultáneamente, en una sesión de la Sociedad geológica de Francia, en 1848, Archiac dio cuenta del descubrimiento por el geólogo Prat de una capa de «numulites» en la provincia de Córdoba. Asimismo, Ansted en su obra sobre la geología de Málaga y parte meridional de Andalucía, cuya versión en español se publicó en 1860, cita numerosas especies de microfósiles; se trata de uno de los primeros trabajos en que se clasifican microforaminíferos.

Por esta época, en el aspecto docente destaca Vilanova y Piera, que fue el primer catedrático de Paleontología de la Universidad de Madrid. En su *Manual de Geología aplicada* (1861) dedica un amplio capítulo a la Paleontología, con un apartado para foraminíferos y otro para infusorios. Poco después surgen algunos científicos españoles que citan especialmente grandes foraminíferos, en trabajos por lo general relacionados con la confección del primer Mapa Geológico de España, cuya realización fue llevada a cabo por ingenieros de minas que seguramente intuyeron la utilidad de los microfósiles para datar los terrenos.

A comienzos del siglo XX hay una serie de investigadores, principalmente geólogos y paleontólogos, que de alguna forma estudian microfósiles. Así, Douville, en 1906, estudia en su tesis de doctorado el Eoceno subbético y señala

bastantes especies de foraminíferos, algunas de las cuales eran nuevas. En 1910 Dalloni realizó un voluminoso estudio geológico sobre el Pirineo aragonés en el que cita muchas especies, principalmente eocenas. Por otra parte, Almera, que en algunos de sus trabajos cita foraminíferos, tradujo del latín al español las obras de De Angelis sobre briozoos de Cataluña (1895, 1898).

Posteriormente, Azpeitia (1911) y Azpeitia y Caballero (1920) publicaron interesantes trabajos sobre diatomeas, y Jiménez de Cisneros describió gran cantidad de afloramientos con microfósiles. Ahora bien, el primero que se dedicó a la realización de estudios micropaleontológicos de gran rigor científico fue Gómez Lluca, quien inició el estudio sistemático de los foraminíferos fósiles, publicando varios artículos y una importante monografía titulada: *Los Nummulítidos de España* (1929). Ésta constituye una obra de obligada consulta para cualquier investigador que trabaje con macroforaminíferos. Otro micropaleontólogo muy conocido fue el reverendo Ruiz de Gaona, quien se dedicó también al estudio de los macroforaminíferos durante la década de 1940, y desarrolló su investigación principalmente en los Pirineos occidentales.

Pero sobre todos destaca Colom, que investigó durante más de 67 años, trabajando como consultor en Mallorca, su isla natal. Con una formación básicamente autodidacta, pues no tenía ningún título universitario (solamente un par de cursos micropaleontológicos que realizó en París y Estrasburgo), publicó 217 trabajos, de los cuales más de la mitad son de Micropaleontología. Su primera publicación data de 1926 y desde entonces investigó sobre los tintínidos y los nannocónus, sobre los que realizó importantes descubrimientos. También fue mundialmente conocido por sus estudios sobre los foraminíferos del Mesozoico y Cenozoico. Publicó importantes monografías: *Introducción al estudio de los microforaminíferos fósiles* (1946), *Litomicrofacies de los terrenos secundarios de España* (1959), *Foraminíferos ibéricos* (1974) y *Los foraminíferos bentónicos del Cretáceo de las Baleares* (1984). Describió más de doscientas especies nuevas y realizó una actividad micropaleontológica aplicada a la prospección petrolífera y a la geología de Mallorca. Sin duda, fue el gran pionero de los micropaleontólogos españoles y durante más de medio siglo se le consideró el más famoso y gran pionero de la Micropaleontología española (Molina, 2003). Falleció en 1993 cuando aún continuaba investigando a los noventa y tres años de edad.

Otro micropaleontólogo destacado fue Vidal (1943-1997) quien a pesar de haber fallecido relativamente joven, llegó a ser muy conocido internacionalmente, tanto por sus lugares de trabajo en las universidades de Lund, Uppsala y Extremadura, como por la publicación de sus investigaciones palinológicas (acritarcos, polen y esporas) en revistas de gran prestigio y difusión.

La creación de las secciones de Geología en la década de 1950, en que empieza a enseñarse la Micropaleontología (bien como asignatura o dentro de la Paleontología general), produce la formación de las actuales generaciones de

micropaleontólogos. Casi simultáneamente se desarrollan los aspectos aplicados debido a la exploración petrolera y minera, y se fundan laboratorios micropaleontológicos por las principales empresas (CIEPSA, 1953; ENADIMSA, 1957). Asimismo, la Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras contrata al italiano Perconig y publica desde 1969 la *Revista Española de Micropaleontología*, que pronto alcanza una gran difusión a nivel mundial. Desde la década de 1970, la puesta en marcha por el Instituto Geológico y Minero de España del proyecto MAGNA ha supuesto un avance importante para la Micropaleontología estratigráfica, ante la necesidad de datar los terrenos en la realización de la cartografía geológica (Ramírez del Pozo, 1992).

En la actualidad existen en España cerca de treinta centros de trabajo donde realizan investigaciones micropaleontológicas más de medio centenar de especialistas que han realizado sus tesis doctorales sobre distintos grupos micropaleontológicos. Más de la mitad de los centros, especialmente los de mayor número de investigadores, dependen de las universidades, algunos del CSIC y muy pocos de empresas. Cuando estos datos se comparan con los de otros países, como EE. UU., donde el 42% de los micropaleontólogos trabajaban en empresas, se evidencia que la iniciativa privada en España ha subestimado el interés de la Micropaleontología aplicada.

1.3. Estado actual

El espectacular desarrollo de la Micropaleontología ha culminado hacia mediados del siglo XX con la publicación de una serie de revistas, catálogos, manuales y tratados, así como de numerosas monografías cuya enumeración resultaría muy extensa.

Las revistas que siguieron a las dos ya citadas, publicadas en Sharon y Stanford (EE. UU.), son las siguientes: *The Micropaleontologist*, EE. UU. (1947-1954); *Micropaleontology*, EE. UU. (1955-); *Voprosy Mikropaleontologii*, URSS. (1956-); *Revue de Micropaléontologie*, Francia (1958-); *Cahiers de Micropaléontologie*, Francia (1965-1997); *Revista Española de Micropaleontología*, España (1969-); *Utrecht Micropaleontological Bulletins*, Holanda (1969-); *Marine Micropaleontology*, Holanda (1976-); *Journal of Micropaleontology*, Inglaterra (1982-) y *Acta Micropaleontologica Sinica*, China (1984-). Además, existen otras más específicas para distintos grupos de microfósiles, como el *Journal of Foraminiferal Research*, así como revistas de carácter más general que publican numerosos artículos micropaleontológicos.

Los aspectos taxonómicos han sido principalmente desarrollados con la publicación de una serie de catálogos sobre distintos grupos. El más voluminoso ha sido el catálogo de foraminíferos recopilado por Ellis y Messina desde 1941.

Asimismo, estos autores han publicado otro catálogo sobre ostrácodos (1953-) y últimamente otro sobre diatomeas (1984-). Además existen los catálogos de nanofósiles de Eisenack *et al.* (1964-), Deflandre y Deflandre-Rigaud (1967-), Farinacci (1969-) y Aubry (1984-), el catálogo de conodontos de Ziegler (1973-), el catálogo de polen y esporas fósiles de Kremp *et al.* (1957-), etc.

Los aspectos teóricos más generales han sido resumidos en los tratados de Paleontología, que incluyen capítulos descriptivos de los principales grupos de microfósiles, destacando por su importancia el publicado por Piveteau (1952-) y el editado por Moore (1953-). Los aspectos teóricos han sido expuestos con más detalle en varios manuales de Micropaleontología: Glaessner (1945, 1963), Pokorny (1954, 1958, 1963), Jones (1956), Cita (1956, 1960, 1971, 1983), De Rivero y Bermúdez (1963), Ramsay, ed. (1977), Haq y Boersma, ed. (1978, 1998), Tappan (1980), Brasier (1980), Bignot (1982, 1988) y Lipps (1993). Todos ellos han contribuido a sentar las bases conceptuales de la Micropaleontología.

Por otro lado, la invención del microscopio electrónico ha permitido revolucionar y casi completar la etapa descriptiva, al hacer posible observar y reproducir detalles inapreciables con los medios ópticos clásicos. Primero se utilizó el microscopio electrónico de transmisión, desde 1950, fundamentalmente en el estudio de nanofósiles, pero la preparación de las muestras era muy laboriosa, se observaban por transparencia y se utilizó poco. Hacia 1970 se generalizó el uso del microscopio electrónico de barrido a todos los nano y microfósiles, ya que permitía observarlos externamente, con una gran resolución, con una gran profundidad de campo y sin necesitar una preparación tan laboriosa.

Actualmente, la Micropaleontología ya no está dominada por la aplicación petrolífera (campo en el que ha desempeñado un brillante papel mutuamente beneficioso), pues hoy en día el mayor número de especialistas realizan su trabajo en las universidades y están menos condicionados por la necesidad de la aplicación. En consecuencia, se ha iniciado una etapa en que los aspectos bioestratigráficos y taxonómicos están perdiendo interés (aunque queda bastante por hacer), en beneficio de aspectos más teóricos, tafonómicos, paleoecológicos, evolutivos y biológicos.

1.4. Interés y relación con otras disciplinas

La Micropaleontología, como disciplina paleontológica, ocupa un lugar de intersección entre las ciencias geológicas y biológicas, y se relaciona en mayor o menor grado con una serie de disciplinas (fig. 1.7). Como puede observarse, el conocimiento taxonómico de los distintos grupos de microorganismos constituye la base y núcleo de la Micropaleontología. Participa de forma interdisciplinar en distintas áreas, en las que es de gran interés debido a las ventajas de los

microfósiles, y contribuye de una forma importante a la solución de problemas muy diversos.

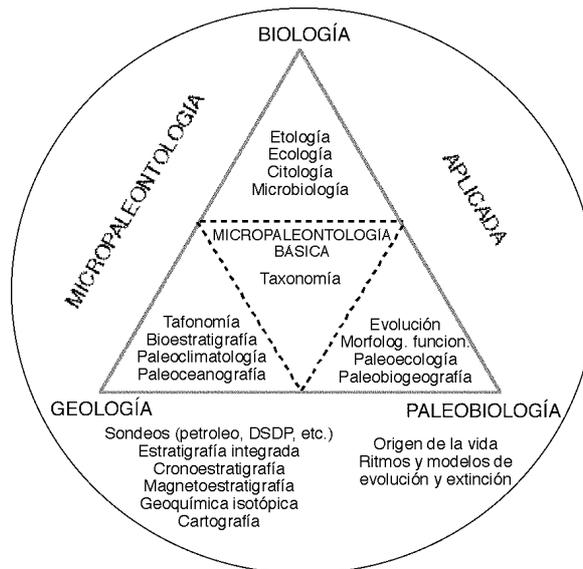


FIGURA 1.7. Campo de aplicación de la Micropaleontología en relación con otras disciplinas de las ciencias geológicas y biológicas.

En el campo de las ciencias geológicas ha sido donde históricamente se ha desarrollado la aplicación más conocida, al poder realizar dataciones con pequeñas muestras de los testigos de sondeos. La bioestratigrafía detallada de los sondeos y de otros estudios geológicos, durante las últimas cuatro décadas, se ha realizado fundamentalmente con foraminíferos planctónicos. En el último cuarto de siglo el desarrollo del proyecto de perforación de los fondos oceánicos (DSDP), actualmente denominado ODP, ha potenciado también la bioestratigrafía con nanofósiles y radiolarios, al ser estudiados los testigos de los sondeos oceánicos realizados por los barcos *Glomar Challenger* y *Joides Resolution*. El programa de perforación de los océanos ha estimulado grandemente otros tipos de estudios, tales como los paleogeográficos y paleoclimáticos. Así, en gran medida las reconstrucciones paleoambientales se han basado en el análisis de isótopos estables del oxígeno y carbono de los esqueletos de los microfósiles. Asimismo, los microfósiles bentónicos están teniendo un papel destacado para la reconstrucción de los antiguos medios ambientes en el tiempo y en el espacio, ya que son excelentes indicadores ecobioestratigráficos y eventoestratigráficos. Después de cada campaña de perforación se han publicado voluminosos informes con todos los datos del estudio de los testigos de los sondeos, incluyendo numerosos artículos

sobre distintos grupos de microfósiles. Por tanto, ha sido importante la contribución de la Micropaleontología, en el marco multidisciplinar del DSDP, al conocimiento paleoceanográfico y a la comprobación de la tectónica de placas.

Por otra parte, el pequeño tamaño de este tipo de fósiles y la continuidad de su registro fósil permiten realizar muestreos detallados a escala centimétrica, con Bioestratigrafía de alta resolución, lo cual es muy importante para la resolución de problemas en Cronoestratigrafía. Actualmente se están definiendo estratotipos de límite entre los pisos sucesivos, y la precisión que aporta la Bioestratigrafía integrada de microfósiles con otros datos está siendo fundamental. El grado de resolución alcanzado en el límite Cretácico/Paleógeno es bien conocido y da una idea de las grandes posibilidades en este campo. Los microfósiles, especialmente los foraminíferos planctónicos, permiten establecer biozonas de alta resolución, que han permitido identificar en muchos cortes, tales como el corte de Caravaca, en la base del Paleógeno por debajo de la Biozona de *P. eugubina*, otra biozona de tan sólo algunos centímetros de potencia.

Además, la gran abundancia de los microfósiles permite realizar estudios cuantitativos cada vez más sofisticados, que aportan una base objetiva a las investigaciones de todo tipo y especialmente de Paleoecología. Asimismo, la Tafonomía está siendo desarrollada de una forma más consciente, al estudiar los procesos que los microorganismos sufren desde que mueren hasta que son encontrados: transporte, disolución, etc.

Con frecuencia se ha tildado a la Micropaleontología de servir exclusivamente a la Geología, olvidando los aspectos biológicos, pero esto no es exacto, pues el ámbito de la Micropaleontología no se reduce a la aplicación a la industria petrolera. Muchos investigadores desde los tiempos de d'Orbigny y Brady han estudiado los microorganismos actuales, desarrollando sus aspectos biológicos e incluso definiendo los nuevos taxones en las publicaciones micropaleontológicas. Las observaciones ecológicas y etológicas en los microorganismos actuales, así como los estudios de morfología funcional, son metodologías muy utilizadas para deducir la Paleotología y la Paleoecología de los microfósiles (Martin ed., 2000). El estudio del origen de la vida en el Precámbrico es un tema interdisciplinar en el que los microfósiles más primitivos tienen una gran importancia. Además, el excelente registro de muchos grupos de microfósiles, con una gran distribución temporal y espacial, proporciona datos muy continuos de líneas evolutivas, y permite establecer los ritmos y modelos de evolución y extinción. En este sentido, los microfósiles están siendo de una importancia capital para establecer los modelos de extinción y las causas de los mismos, siendo el evento del límite Cretácico/Paleógeno un buen ejemplo que ilustra el destacado papel de la Micropaleontología en la resolución de un problema multidisciplinar. Todo ello está contribuyendo a superar la etapa descriptiva para convertirse en una disciplina más evolutiva y conceptual.

1.5. Micropaleontología aplicada

Como hemos puesto de manifiesto anteriormente (Molina, 1995), el carácter aplicado de la Micropaleontología ha sido una constante desde su nacimiento, pues el francés d'Orbigny, que puede ser considerado como su fundador, ya constató el potencial valor bioestratigráfico de los microfósiles. En este sentido, el punto de partida como ciencia aplicada se inicia hacia 1823, cuando por primera vez se utilizaron estratigráficamente los *Nummulites*. Poco después, en 1850, se propuso la primera zonación basada en ostrácodos. Las primeras aplicaciones del estudio de los microfósiles a los sondeos se realizaron en 1874, cuando se dató una formación sondeada en Alemania; y en 1877, cuando se dataron las rocas atravesadas en sondeos hidrogeológicos en la región de Viena. Ahora bien, la primera aplicación de la investigación micropaleontológica a la prospección petrolífera se realizó en Polonia en 1897.

Sin embargo, el desarrollo de la Micropaleontología aplicada se viene produciendo desde 1900 en los EE. UU., sobre todo en la década de 1920, al generalizarse el uso de los microfósiles para determinar la edad de los testigos de sondeos de la industria petrolera. Las principales compañías petroleras establecieron sus propios laboratorios micropaleontológicos; por otra parte, desde entonces también se han formado consultores que han estudiado muestras micropaleontológicas. Así se han establecido escalas bioestratigráficas para las cuencas petrolíferas y se han realizado importantes avances en la datación y reconstrucción de los medios ambientes (Simmons, ed., 1994, Jones, 1996). Sin embargo, la aplicación paleoecológica en los últimos tiempos se ha desarrollado en los medios académicos independientemente de la industria petrolera, principalmente debido al programa de perforación de los océanos DSDP-ODP (Moguilevsky y Whatley, eds., 1996) y al desarrollo de la Micropaleontología del Cuaternario (Haslett, ed., 2002).

El desarrollo de la Estratigrafía secuencial ha potenciado la Micropaleontología como parte fundamental de una geociencia integrada. Además, existen otras disciplinas como la Magnetoestratigrafía, que también dependen de dataciones muy precisas, que deben hacerse con microfósiles para poder identificar con seguridad los distintos crones. Por otra parte, la Geoquímica de isótopos del oxígeno y carbono obtiene sus mejores resultados cuando se analizan las conchas de los microfósiles. Asimismo, los microfósiles están siendo ahora utilizados no sólo para estudiar eventos pasados sino también para detectar recientes problemas medioambientales (Martin, ed., 2000, Haslett, ed., 2002). En consecuencia, según Civis *et al.* (1989), la Micropaleontología es considerada la rama de la Paleontología con una mayor potencialidad desde el punto de vista práctico en la Geología aplicada, y según Jenkins (1993) ha llegado a ser de una gran ayuda en la Ingeniería geológica y Geología económica.

En conclusión, los microfósiles tienen numerosas ventajas debido a su pequeño tamaño, gran abundancia y amplia distribución, habiendo permitido el desarrollo de la Micropaleontología aplicada, la cual ha colaborado a la solución de importantes problemas geológicos (bioestratigráficos y paleoecológicos) y paleobiológicos (evolución y extinción). La creciente precisión que actualmente requieren los estudios de este tipo hacen cada día más necesarios los datos aportados por el excelente registro de los microfósiles, y los mejores resultados se obtienen en el marco de proyectos multidisciplinarios.

Bibliografía

- BIGNOT, G. 1982. *Los microfósiles* (trad. 1988, reed. 2001). Paraninfo, Madrid, 1-284.
- BOLTOVSKOY, E. 1965. *Los Foraminíferos Recientes*. Eudeba, Buenos Aires, 1-509.
- BRASIER, M. D. 1980. *Microfossils*. George Allen y Unwin, Londres, 1-193.
- BRÖNNIMANN, P. 1965. La Micropaléontologie, son caractère et ses tendances actuelles. *Archives des Sciences*, 18(2), 327-340.
- 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.
- CITA, M. B. 1956. *Micropaleontologia* (reed. 1960, 1971, 1983). Cisalpino-Goliardica, Milán, 1-458.
- CIVIS, J., SIERRA, F. J. y FLORES, J. A. 1989. Nuevas tendencias de la Micropaleontología. En: *Paleontología. Nuevas tendencias* (E. Aguirre, ed.). CSIC, Madrid, 341-358.
- COLOM, G. 1946. *Introducción al estudio de los microforaminíferos fósiles*. CSIC, Madrid, 1-376.
- CRONEIS, C. 1941. Micropalaeontology – past and future. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 25, 1208-1255.
- CUSHMAN, J. A. 1940. *Foraminifera. Their classification and economic use* (reed. 1948, 1955). Harvard University Press, Massachusetts, 1-605.
- EHRENBERG, C. G. 1854. *Mikrogeologie*. L. Voss, Leipzig, 1-374.
- GALLOWAY, J. J. 1933. *A Manual of Foraminifera*. Principia Press, Bloomington, 1-483.
- GLAESSNER, M. F. 1945. *Principles of Micropaleontology* (reed. 1963). Hafner, Nueva York, 1-297.
- HAQ, B. U. y BOERSMA, A. eds. 1978. *Introduction to Marine Micropaleontology* (reed. 1998). Elsevier, Nueva York, 1-376.
- HASLETT, S.K. ed. 2002. *Quaternary Environmental Micropaleontology*. Arnold, Oxford University Press, 1-340.
- JONES, D. J. 1956. *Introduction to microfossils*. Harper, Nueva York, 1-406.
- JONES, W. J. 1996. *Micropaleontology in Petroleum Exploration*. Clarendon Press, Oxford, 1-432.
- JENKINS, D. G. ed. 1993. *Applied Micropaleontology*. Kluwer, 1-269.

- KAMINSKI, M. A., GEROCH, S. y KAMINSKI, D. G. eds. 1993. *The Origins of Applied Micropaleontology: The School of Josef Grzybowski*. Alden, 1-336.
- LIPPS, J. H. 1981. What, if anything, is Micropaleontology? *Paleobiology*, 7(2), 167-199.
- LIPPS, J. H. ed. 1993. *Fossil Prokaryotes and Protists*. Blackwell, 1-342.
- MARTIN, R. E. ed. 2000. *Environmental Micropaleontology*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, Topics in Geobiology, 15, 1-481.
- MOGUILEVSKY, A. y WHATLEY, R. eds. 1996. *Microfossils and Oceanic Environments*. University of Wales, Aberystwyth Press, 1-434.
- MOLINA, E. 1982. Introducción de la Micropaleontología en España, En: *Actas II Congreso de la SEHC* (M. Hormigón, ed.), 2, 249-261.
- MOLINA, E. 1995. Micropaleontología aplicada: historia de una fructífera colaboración. *Tierra y Tecnología*, 11, 21-28.
- MOLINA, E. 1998. Capítulo x, Micropaleontología. En: *Tratado de Paleontología* (B. Meléndez, ed.). CSIC, Madrid, 1, 295-327.
- MOLINA, E. 2003. Guillermo Colom, gran pionero de la Micropaleontología española. En: *Conferencias en Palma de Mallorca* (G. Mateu, ed.), (en prensa).
- POKORNY, V. 1954. *Principles of Zoological Micropaleontology* (reed.1958, 1963). Pergamon Press, Oxford, 1, 1-652; 2, 1-465.
- RAMÍREZ DEL POZO, J. 1992. Micropaleontología en España: situación actual y perspectivas. En: *Actas VI Jornadas de Paleontología* (A. Linares et al., eds.), 19-34.
- RAMSAY, A. T. S., ed. 1977. *Oceanic Micropaleontology*. Academic Press, Londres, 2, 1-1453.
- RIVERO, F. CH. DE y BERMÚDEZ, P. J. 1963. *Micropaleontología general*. Gea, Barcelona, 1-808.
- SIESSER, W. G. 1994. Historical background of coccolithophore studies. En: *Coccolithophores* (A. Winter y W.G. Siesser, eds.) Cambridge University Press, 1-11.
- SIMMONS, M. D., ed. 1994. *Micropalaeontology and Hydrocarbon Exploration in the Middle East*. British Micropalaeontological Society Publication Series. Chapman y Hall, 1-418.
- TAPPAN, H. 1980. *The Paleobiology of Plant Protists*. W.H. Freeman, San Francisco, 1-1028.

