An aerial photograph of sand dunes, showing the intricate, rhythmic patterns of wind-eroded sand ripples. The dunes are illuminated from the upper left, creating a gradient of light to dark across the scene. The ripples are closely spaced and run parallel to the dune's slope.

Ilustre Colegio
Oficial de Geólogos

LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO



ILUSTRE COLEGIO OFICIAL
DE GEÓLOGOS

© de los textos: sus autores, 2009

© de las imágenes: sus autores, 2009

© de la edición: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid, 2009

ISBN: 978-84-920-0978-7

Depósito legal: M-51.444-2009

Gestión editorial: CYAN, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.

Printed in Spain / Impreso en España

Reservados todos los derechos

Índice

Prólogo	7
Luis E. Suárez Ordóñez	
Breve historia de las instituciones geológicas en España	11
Carlos Martín Escorza	
Reseña histórica de la profesión geológica en España	29
José Manuel Baltuille Martín	
El geólogo y la hidrogeología	55
Marc Martínez Parra	
El geólogo en la exploración y explotación minera	77
Manuel Regueiro y Roberto Oyarzun	
El geólogo en la exploración y producción de hidrocarburos	97
Wenceslao Martínez del Olmo	
El geólogo y el medio ambiente	121
Manuel de Tena-Dávila	

El geólogo cartógrafo	155
Roberto Rodríguez Fernández, Fabián López Olmedo, Ángel Martín Serrano, Jerónimo Matas, Luis Miguel Martín Parra, Manuel Montes y Francisco Nozal	
El geólogo como enseñante universitario	175
José Gisbert	
Geología en la cooperación al desarrollo	181
Ángel Carbayo y Juli Rubio	
¿Geóloga o profesora?	195
Leonor Carrillo Vigil	
El geólogo planetario o astrogeólogo	201
Jesús Martínez Frías	
El geólogo en los riesgos naturales	219
Miguel Ángel Rodríguez Pascua	
El geólogo geoquímico	239
Javier Escuder Viruete	
El geólogo geofísico	259
Enrique Aracil Ávila	
Patrimonio geológico y geodiversidad	275
Juan José Durán Valsero y Luis Carcavilla Urquí	
El geólogo geomorfólogo	293
Juan Ramón Vidal Romaní	
El geólogo paleontólogo	311
María Isabel Gómez García	
Mujeres y geología en España	331
M. I. Gómez, A. M. Alonso-Zarza, J. Álvarez-Marrón, A. Calonge, C. Díaz, M. A. Díez-Balda e I. Gil-Peña	
El geólogo gemólogo	353
Cristina Sapalski	

Prólogo

Luis E. Suárez Ordóñez

Presidente del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG)

Desde la mitad del siglo XIX hasta la actualidad, el conocimiento de la geología española y su práctica profesional han sufrido un cambio muy sustancial. Atrás han quedado aquellos años heroicos cuando el geólogo sólo se ganaba la vida como profesor de instituto o algo similar, pues la práctica profesional estaba en manos de los ingenieros de minas que, en gran parte, suplían la carencia de titulados en Geología con los conocimientos parciales que recibían en su carrera. No fue hasta después de la Guerra Civil, cuando las facultades de Ciencias comenzaron a tener más alumnos de Ciencias Naturales, que era como se llamaba oficialmente la titulación. Muchos de estos titulados se hicieron geólogos, pero no fue hasta 1954 cuando se estableció la licenciatura propiamente dicha de Ciencias geológicas. Desde entonces, el número de licenciados en Geológicas fue en aumento, llegando a formar la suficiente masa crítica como para solicitar la creación de un colegio profesional. Esto se produjo en 1978, no sin oposición de otros profesionales. A partir de ese momento, el colectivo de geólogos españoles, ya conformados en colegio profesional, sólo ha vivido para dignificar la profesión de geólogo y demandar su lugar en el mercado laboral. Atrás quedaban los tiempos en que el geólogo se dedicaba a la enseñanza. Ahora, el geólogo quería ejercer como profesional y ganarse la vida ejerciendo la profesión.

Actualmente, el conocimiento geológico es tan amplio que se ha tenido que compartimentar en especialidades, muy útiles para el desarrollo social y equiparables a las que practican, desde hace muchos más años, los geólogos de otros países. Cada vez son más los geólogos que se dedican a ejercer la geología y no tienen que renunciar al esfuerzo de estudiar una carrera para luego dedicarse a otra cosa.

A lo largo de los últimos años, el colegio ha trabajado intensamente por modificar el estatus profesional del geólogo dentro del marco legislativo. Se ha actuado sobre muchas leyes que han reconocido la necesidad de contar con verdaderos profesionales que sepan geología. De esa manera, muchos campos de actividad que antes estaban vedados a los geólogos, se han abierto a la libre competencia. Aún quedan otros que diversos profesionales se atribuyen como reserva de actividad y que, esperemos, dejen de existir con la entraba en vigor de la Directiva europea de servicios. El colegio también ha conseguido recientemente que la profesión de geólogo sea una profesión regulada. Ya no somos profesionales de segunda; hemos pasado a la primera división. ¡Ya era hora!

Son ya muchos los campos de actividad en donde el mercado demanda geólogos. El más importante, por el volumen de trabajo, es el de la obra civil y edificación. Pero no por ello hay que olvidar otras actividades nuevas que surgen en el mercado, como gestores ambientales, gestores de patrimonio, además de las tradicionales de recursos naturales, hidrogeología, paleontología, etc.

El conocimiento geológico del terreno requiere, sin duda, un especialista en la materia. En otras palabras, se necesitan geólogos bien formados; éstos que saben cartografiar los materiales, distinguirlos, conocer la estructuras que forman y descifrar cómo continúan en el subsuelo. Actuar hoy sobre el terreno sin conocerlo bien es, cuando menos, una frivolidad y una osadía. Las intervenciones sobre el terreno son cada día más complejas y de mayor riesgo. Las estructuras de obra civil están pasando a ser megaestructuras cuya construcción requiere un conocimiento muy detallado del lugar donde se asientan. Todo ello ha llevado a requerir en el campo profesional verdaderos geólogos especialistas en el tratamiento del terreno. Pero no todo es obra civil o edificación.

Por otro lado, la necesidad de recursos naturales ha llevado a investigaciones difíciles donde antes era imposible investigar. Los geólogos vuelven a hacer su aparición en este campo con sus conocimientos precisos de yacimientos minerales, petrología, geoquímica y estructuras profundas, para localizar los recursos energéticos y no energéticos que la sociedad demanda. El progreso pasa por la búsqueda de materiales cada vez mejores y abundantes.

En este libro se pretende dar una visión al ciudadano de las especializaciones que actualmente tiene el geólogo para cubrir todas las demandas que requiere un desarrollo sostenible. El objetivo del mismo es dar a conocer a la sociedad lo que hacemos los geólogos, pues el desconocimiento que tienen de nosotros y de nuestra actividad es tan grande que quedamos perplejos cada vez que nos preguntan a qué nos dedicamos. Cada capítulo ha sido escrito por un verdadero profesional que conoce muy bien lo que

escribe, ilustrando parcialmente lo expuesto en el texto. No están todas las especializaciones que existen aunque sí la mayoría de las tradicionales. El lenguaje utilizado es sencillo y comprensible para que llegue mejor el contenido.

Esperamos que este libro sea de utilidad para el lector, y deseamos que su lectura haga que la geología y los geólogos españoles seamos mejor conocidos y valorados profesionalmente.

Breve historia de las instituciones geológicas en España

Carlos Martín Escorza
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC
Miembro de INHIGEO

Introducción

En el relato de la historia de cómo se ha avanzado en el estudio geológico de cualquier país o región, es posible distinguir hasta tres aspectos bien diferenciados: la evolución del conocimiento que se refiere a la constitución y distribución de las rocas que componen el territorio, la de los modelos que han tratado de explicar la existencia de esos datos, el de la biografía de las personas que han hecho realidad esos resultados y el de las instituciones que les han arropado. En estas páginas sólo se hablará del último aspecto pues ése es el objetivo que el editor ha encargado.

Al hablar de la historia de las instituciones en España, un país con una acumulación de sucesos de varios siglos de documentación, es tentador iniciar los datos remontándose a épocas lejanas, en algunos casos altomedievales y aun en otros anteriores, pero no se ha considerado éste el lugar para hacer una semblanza tan lejana sino que, en concordancia con el título, se han acotado las primeras referencias a la mitad del siglo XVIII, por ser este tiempo el más significativo en cuanto a la aparición y resurgimiento de instituciones dedicadas al estudio. Asimismo, no se han reflejado aquí los acontecimientos más recientes sino los que pueden considerarse como más relevantes, pues de entrar de lleno en ellos se estaría expuesto a perder el objetivo impuesto.

La historia de las instituciones creadas en América se escapa de la línea de descripción preferente pero lo cierto es que, entonces, en el siglo XVIII y parte del XIX, América también era España y, aunque no se desarrolle ese asunto, es preciso hacer constar la

considerable doble influencia que hubo durante el siglo XVIII entre la geología y minería entre los dos continentes, a través de España. Por una parte, desde los conocimientos adquiridos necesarios para conseguir una mejor explotación de los ricos yacimientos, sobre todo de México y Perú, y por otra debido a la contratación de “expertos” mineros tanto españoles como extranjeros —estos últimos de Alemania, fundamentalmente— que fueron enviados a América o estuvieron de profesores en las recién creadas escuelas de la metrópoli. Es de destacar, por ejemplo, la creación en 1774 del Colegio de la Minería de México, dirigido por Velázquez de León y que, tras su fallecimiento, el virrey José Gálvez hizo sustituir por Fausto de Elhuyar¹ quien a su vuelta a España, en 1821, e inspirado por los conocimientos adquiridos en América introdujo una gran modernización en los asuntos mineros españoles. La marcha de Elhuyar la sustituyó Gálvez con Manuel Andrés del Río, otro gran minero y metalúrgico². Los flujos y reflujos intercontinentales de científicos y mineros supondrán un crecimiento acelerado de estas ciencias y la comprensión, cada vez más evidente, de la necesidad de creación y sostenimiento de escuelas y gabinetes para el estudio de estas disciplinas. En ese contexto, cabe subrayar la propuesta de Antonio de Ulloa, quien después de la más que famosa expedición a América para medir la longitud del meridiano hace lo posible para que se cree en España el Gabinete de Historia Natural.

Éste es un trabajo de recopilación y síntesis, por tanto, más que “referencias” se han listado en el apartado de bibliografía todas las fuentes consultadas, incluyendo responsabilidad sólo puntualmente en el caso de mencionar algún asunto que merezca la pena respaldar con el origen de la información. Aunque se hacen comentarios de carácter general, el método que se ha utilizado para exponer esta “breve historia” ha sido el de tabular por medio de fechas los acontecimientos, como si se trataran de noticias de prensa, pues con ello se ahorra espacio y palabras de enlaces entre unos y otros sucesos y se confiere, creo, mayor claridad a la lectura y a los datos. Es un método que con éxito ya han seguido otros autores, como Ríos (1959) y Virgili (2003), y que se manifiesta como útil y claro.

Un adelanto acerca de las conclusiones que se pueden extraer de este artículo, es que las instituciones aquí tratadas tienen una gran historia entrelazada a veces, por no decir casi siempre, de muy difícil disgregación, y casi todas ellas están influidas por el “medio ambiente” social y económico. Así, en Madrid, la Universidad y el Museo de Ciencias Naturales han formado durante décadas una simbiosis muy difícilmente separable. Por otra parte —aunque de más reciente creación— el CSIC, el mismo MNCN y la Universidad, en lo referente al avance y estudio de la geología, han mezclado tanto su historia, tienen tantas etapas compartidas, que es difícil su separación en bloques impermeables.

1. F. de Elhuyar descubrió el wolframio.

2. M. A. del Río descubrió el vanadio.

Del Gabinete de Historia Natural al Museo Nacional de Ciencias Naturales

Los documentos acerca del origen del actual Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN) se encuentran en el Archivo del propio museo y fueron transcritos y sintetizados por A. J. Barreiro (Oviedo, 1865-Madrid, 1936). Ellos son la principal fuente para conocer la historia del MNCN, la institución quizá más antigua de España ligada a la Geología. Se publicaron en dos etapas distintas, una primera edición se hizo en 1944 y la más reciente es de 1992.

- 1752 El libro de Barreiro, tanto en su edición de 1944 como en la de 1992, se inicia con una frase clara y rotunda: “el proyecto de fundar en España un Gabinete de Historia Natural fue obra del insigne marino D. Antonio de Ulloa, quien lo expuso al Rey D. Fernando VI en el año 1752, en un razonado escrito. El entusiasmo del Rey fue manifiesto y en ese mismo año se alquiló un local en la calle de la Magdalena, esquina a Lavapiés [sic]. Allí se instala el Gabinete del que fue su primer director el mismo Antonio de Ulloa³ asignándosele personal y presupuesto”.
- 1755 Sea porque los proyectos que Ulloa pensaba realizar se vieron frustrados, sea porque fue reclamado para supervisar las obras del Canal de Castilla, que entonces se iniciaba en Palencia, o por ambas justificaciones a la vez, el caso es que en 1755 Ulloa dimite de su cargo al frente del Gabinete. Y quizá, con la ausencia de tan prestigioso personaje, en 1756, el Gabinete sufre recortes en sus ya exiguos locales.
- 1757 Parte de su instrumental fue llevado a otros lugares.
- 1766 Se recibió en el Gabinete la Orden de que el P. Enrique Flórez pudiera recoger todos los ejemplares que eligiera con destino al entonces Príncipe de Asturias. Y también se dio esa misma prerrogativa a Luis de Camuz de Linaza. Ambas fueron ejecutadas, por lo que el Gabinete se quedó ostensiblemente empobrecido de materiales, sólo con “algunos fósiles, varias rocas y minerales, y unas pocas muestras del reino animal” (Barreiro, 1992).
- 1767 El Gabinete se hallaba en la casa de “Aposento” cuya ubicación se desconoce por ahora.
- 1763-1775 Aunque no se tienen datos respecto a cuántos ni a dónde, se sabe que entre 1763 y 1775 el Gabinete es trasladado de un lugar a otro, en una premonitona peregrinación de lo que sería su porvenir futuro.
- 1775 El día 30 de diciembre de 1775, el rey Carlos III, acompañado del infante Luis, visitó el Gabinete para ver cómo iban sus preparativos para la nueva apertura.

I 3. A. de Ulloa descubrió el platino.

- 1776 El 4 de noviembre, día de San Carlos, y bajo el lema que aún preside la entrada al edificio: *Carollum III rex naturam et artem sub uno tecto in publicam utilitatem consociavit*, se reabre de nuevo, en lo que parecía ser el destino final del Gabinete, el edificio que actualmente se ubica en la calle Alcalá 13, dándosele Fuero y Privilegios como perteneciente a la Casa Real y cambiando su denominación por la de Real Gabinete de Historia Natural (RGHN). La exposición de numerosos objetos extraordinarios traídos de América hizo de este acontecimiento un éxito. Aunque, como subraya Lucena Giraldo (2001), quizá este acontecimiento más que reflejar la culminación de un proyecto mantenido y sostenido fue el final afortunadamente feliz de una serie de tristes fracasos para lograr su creación desde hacía algunas decenas de años.
- 1784 Hubo una propuesta de restaurar el Gabinete por parte de José Martínez Lárraga.
- 1785 Eran manifiestas las deficiencias del local, así que Carlos III dispuso que se iniciasen las obras de un gran museo en el paseo de la Castellana al lado del Real Jardín Botánico. Y así se hizo, pero el proyecto se interrumpió con la muerte del monarca. Su sucesor, Fernando VII, sería el encargado de terminarlas, pero su esposa Isabel de Braganza le convenció para que en vez de ser destinado para las ciencias naturales el edificio albergara las colecciones de pintura y escultura, el actual Museo del Prado (Hernández-Pacheco, 1944).
L. Proust pasa de la Academia de Artillería de Segovia al RGHN.
J. Townsend fue uno de esos viajeros extranjeros que durante el siglo XVIII recorrieron España. Él lo hizo entre 1786 y 1787 y una de sus visitas fue precisamente el Real Gabinete de Historia Natural. Su opinión en cuanto a la colección de minerales es que era "magnífica, aunque ni ha sido bien elegida ni está adecuadamente ordenada", alabó sobre todo las piezas de oro, plata y piedras preciosas, y resumió sus críticas al advertir el escaso "aspecto científico" con que se presentaban las piezas.
- 1798 Clavijo y Fajardo envía al ministro F. de Saavedra un informe titulado "Medios de hacer útil para la prosperidad de la nación española el Real Gabinete de Historia Natural" donde propone el incremento de la investigación científica sobre el esfuerzo expositivo que entonces se estaba haciendo.
- 1799 Desde el Gabinete se estaba haciendo ya entonces investigación, como queda mostrado en los artículos publicados por la revista *Anales de Historia Natural*⁴ que desde el mismo centro se estaba editando bajo el impulso de Cabanilles y de C. Herrgen; publicación que duró hasta 1805 y que se considera la primera revista científica sobre geología editada en España (Fernández Pérez, 1993; Puche Riart, 2001).

4. Una interesante contribución a la geología se dio en su volumen 1, 297-304, en el que Nicolás Segundo de Franqui publicó una detallada descripción de la erupción que el 9 de junio de 1798 se había producido cerca del Pico del Teide, en Tenerife, y que escribió sólo nueve días después de ocurrido el suceso.

- 1808 Con la llegada de Napoleón el local se cierra de nuevo y es saqueado.
- 1812 Se suprime la referida Junta de Protección, la cual es reestablecida en 1824, aunque por poco tiempo pues en 1828 todos sus componentes dimiten por conflictos con los profesores del propio museo, lo que llevó al entonces rey Fernando VII a tomar la decisión y toma de postura de disolver la Junta de Profesores y reforzar con ello el poder de la Junta de Protección, que en 1832 pasa a depender del ministro de Fomento.
- 1814 Se reabre de nuevo y en 1815 pasa a denominarse Real Museo de Ciencias Naturales, siendo gobernado por una Junta de Protección cuyo presidente era el mismo ministro de Estado y que, en esa época, lo fueron el Marqués de Santa Cruz y, después, el Marqués de Cerralbo.
- 1845 El Museo pasa a depender de la Facultad de Filosofía y se nombra a un jefe local, cargo que recae en Mariano de la Paz y Graells, siendo director del centro el decano de la mencionada Facultad, que tampoco sería definitivo pues en 1848 la dirección la lleva el rector de la Universidad Central.
- 1851 La reforma sostenida por Bravo Murillo hace que, en 1851, el Museo pase a depender del Ministerio de Comercio, Industria y Obras Públicas, nombrándose como director a Graells.
- 1856 El caos todavía puede hacerse mayor y se hace. En 1856 se cesa a Graells y de nuevo el Museo pasa a depender del rector de la Universidad. Y en 1857 la reforma de Moyano coloca de nuevo a Graells como director.
- 1867 Se retiran los materiales que se crean oportunos para crear el Museo Arqueológico. Se separan de él el Real Jardín Botánico y el Jardín Zoológico.
- 1868 La reforma de Moyano hace restablecer la Junta de Profesores y el centro toma el nombre de Museo de Ciencias Naturales.
- 1895 Por Real Decreto se conmina al Museo a desalojar “en veinticuatro horas” sus locales de la calle de Alcalá. Lo firmaba el ministro de Fomento Alberto Bosch y Fustigeuras.
- 1901 Siendo director Ignacio Bolívar, se pronuncia un Real Decreto del ministro A. García Alix, por el que en el Museo se deberán seguir las enseñanzas académicas de Ciencias Naturales. Este hecho puede ser visto desde ópticas distintas ya que lo que quizá para sus profesores pareció entonces un avance significativo, la perspectiva del tiempo hace ver, por ejemplo a Aguirre (1992), que esa circunstancia hizo que el Museo “vendría a ser el laboratorio de prácticas para la Zoología, Mineralogía y Paleontología” cuyas clases se impartían en la Universidad.
- 1907 Se crea la Junta de Ampliación de Estudios, quedando el Museo adscrito a ella.
- 1908 El entonces director, Ignacio Bolívar, consigue que se asignen al Centro el ala Norte del Palacio de las Artes y de la Industria, su ubicación actual.
- 1910 Se retiran las piezas que se creen oportunas para el recién creado Museo de Antropología, Etnología y Prehistoria.

- 1913 Toma el nombre actual de Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- 1935 Se consigue ampliar la superficie del centro al serle asignada el ala sur del mismo edificio, con todos sus ventanales al Oeste.
- 1941 Se crea el Museo de América y son retiradas del Museo Nacional de Ciencias Naturales las piezas de procedencia americana para formar parte del recién formado.
- 1980 La sección inferior del ala sur que era ocupada por algunos departamentos del Instituto Lucas Mallada, pasa a ser el centro del CSIC Instituto de Geología, de nueva creación.
- 1990 El Instituto de Geología que ocupaba parte del ala sur del Museo pasa a ser también integrante del propio Museo Nacional de Ciencias Naturales, unificándose entonces los distintos centros del CSIC que en él se ubicaban.

Como hemos visto, el Gabinete de Historia Natural o Real Gabinete de Historia Natural (RGHN), se inicia reinando Fernando VI a instancias de Antonio de Ulloa, enriqueciéndose a partir de entonces con las aportaciones traídas desde América y las compras y donaciones hechas a las diversas colecciones particulares (Dávila, Foster, Mutis, Humboldt, etc.). Pero su periplo tiene el tinte de catástrofe casi desde la misma época de su fundación, pues a sus vicisitudes de ubicación, de constantes pérdidas de materiales, espacio y hasta de ausencia de objetivos con que presentarse ante la sociedad, se unieron las de la mala fortuna de que, cuando todo parecía favorecer su suerte con la construcción para él de un nuevo edificio, el actual del Museo del Prado, éste pasara, por voluntad de la reina Isabel de Braganza, a ser una pinacoteca. Y pinacoteca lo es, querida y admirada por todos, pero el edificio tiene, eso sí, la estructura y disposición de salas que unos profesores de Ciencias Naturales dieron para guardar y estudiar mejor los minerales y los fósiles.

El Instituto Geológico y Minero de España

El interés en España por la minería proviene de tiempos prehistóricos, así que hay que hacer un esfuerzo de disciplina para no caer en la tentación de hablar de antecedentes más allá de los límites que nos hemos impuesto. Sólo señalar que, en lo que atañe a instituciones, tenemos al menos el referente de que ya en 1624 Felipe V creó la llamada Junta de Minas. Y también el dato significativo de que parece ser que la primera escuela de minas española fue el llamado Real Seminario de Minas y Metalurgia de México, fundado en 1775 por Fausto Elhuyar (Novo y Fernández Chicarro y Ortega Gasset, 1950).

A lo que este autor no ha podido sustraerse es a señalar que en la bisagra entre las dos grandes épocas de la mitad del siglo XVIII, con un antes y un después en el avance de la minería y, en general, geología en España, se produjeran dos hechos para los que

todavía se espera el estudio de su posible influencia en ese progreso: lo sucedido en la noche del 5 de enero de 1755 en la que se incendiaron las minas de Almadén, durando la catástrofe varios años; y el terremoto de Lisboa, producido el 1 de noviembre de ese mismo año de 1755.

La cronología de los hechos más significativos que atañen a la historia de la importante institución a la que estamos refiriéndonos, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), son:

- 1777 Se crea la Academia de Minas de Almadén.
- 1789 Se crea la Escuela de Mineralogía de Indias.
Se crea el Laboratorio Químico Metalúrgico.
- 1802 Se reorganiza la Escuela de Almadén. Reinaba Fernando VII.
- 1825 Promulgación, el 4 de julio, de la Ley de la Minería cuyo Preámbulo fue redactado por Fausto Elhuyar, y que trajo como consecuencias inmediatas algunas de las que se enumeran a continuación.
- 1834 Se imprime el que se considera primer mapa geológico de una cierta extensión del territorio español, es decir, el Mapa Petrográfico de Galicia, cuyo autor fue Guillermo Schulz.
- 1835 Se crea la Escuela Especial de Minas en Madrid, como resultado del traslado a la capital de la Academia de Minas de Almadén, que queda como lugar de clases prácticas.
- 1836 Se inaugura la Escuela Especial de Minas, con las siguientes materias de estudio: Mineralogía, Geognosia, Laboreo de Minas, Mecánica aplicada a las minas, Docimasia y Metalurgia.
- 1838 Sale el primer número de los Anales de Minas, editado por la Dirección General de Minas, de los que sólo vieron la luz dos volúmenes.
- 1842 Aparece el Boletín Oficial de Minas.
- 1849 Se crea la Comisión para formar el Mapa Geológico de Madrid y General del Reino, cuyo heredero directo actual es el Instituto Geológico y Minero de España. Fue creada durante el reinado de Isabel II y a instancias del entonces ministro Juan Bravo Murillo. Hasta 1870 estuvo ubicada en el antiguo palacio del Duque de San Pedro, en la calle Florín 2 (figura 1). Pasó después al convento de la Trinidad, en la calle Atocha 14, y después a la calle Isabel la Católica 23. Y aun pasaría posteriormente a ubicarse en la plaza de los Montes de 2.
- 1850 Aparece la Revista Minera, sostenida por el Cuerpo de Ingenieros de Minas. Aparece el primer volumen de las Memorias de la Academia de Ciencias de Madrid.
- 1852 Se publica la primera Memoria de la Comisión del Mapa Geológico, es la explicación "en bosquejo" de la Geología de Madrid cuyo autor es Casiano de Prado.



Figura 1. Primer domicilio de la Comisión del Mapa Geológico de España en la calle Florín, 2. Foto: Clifford, 1853. Museo de Historia, Madrid.

- 1859 Al comenzar el año se teme por la continuidad de la Comisión del Mapa Geológico de España, pero unos meses después se dota a la misma de muchos más medios de los que antes disponía.
- 1860 La Escuela de Minas se traslada desde la calle Florín a la plaza del Conde de Barajas.
- 1864 Publicación de la descripción geológica de la provincia de Madrid, por Casiano de Prado.
- 1870 La antigua Comisión para formar el Mapa de Madrid y del Reino pasa a denominarse Comisión del Mapa Geológico de España.
- 1874 Publicación del primer tomo de las Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España, en este caso se refiere a la provincia de Zaragoza y su autor Martín Donaire.
- 1881 Traslado de la Escuela de Minas desde la plaza del Conde de Barajas al paseo de Atocha, junto al cerro de San Blas.
- 1885 La Escuela de Minas es trasladada desde el paseo de Atocha a la calle Génova.

- 1894 Inauguración del nuevo edificio de la Escuela de Minas, en su actual ubicación de la calle Ríos Rosas.
- 1910 La Comisión del Mapa Geológico de España pasa a denominarse como Instituto Geológico de España (IGE).
- 1927 El Instituto Geológico de España se transforma en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
Se inician las publicaciones de las Hojas geológicas a escala 1:50.000 de toda España. La primera en hacerlo es la de Cantillana (Sevilla).
- 1957 Se crea la Comisión Nacional de Geología, adscrita al IGME.
- 1971 Se aprueba el Plan MAGNA para la cartografía geológica nacional a escala 1:50.000. El proyecto se da por concluido en 2003.
- 1977 El IGME pasa a ser un organismo autónomo.
- 1986 El IGME toma el carácter de Organismo Público de Investigación (OPI).
- 1988 El IGME pasa a denominarse Instituto Tecnológico y Geominero de España (ITGE).
- 2000 El ITGE de nuevo toma su antigua denominación de IGME.
- 2003 Se actualiza y regula el funcionamiento de la Comisión Nacional de Geología.
- 2004 Por primera vez en la historia del IGME su director es un geólogo.

Universidad y CSIC

Conviene antes de nada conocer que para la enseñanza y la investigación en España durante los tiempos de la Baja Edad Media, que es cuando surgen universidades, hay opiniones que manifiestan que éstas se diferencian del resto de las de Europa por prestar mayor atención al asentamiento de las bases espirituales cristianas que a los asuntos propios de la investigación científica, quizá porque están cercanas a la frontera de la Reconquista (Gómez Oyarzún, 1998). Y este bagaje de relación entre conocimiento (razón) y religiosidad (fe), cuya valoración eludo totalmente, ha perdurado hasta algunos tiempos y es muy posible que se halle todavía presente en la actualidad. Y esto parece más evidente, en mi opinión, cuando ya no consideramos en nuestra visión sólo a España sino que ampliamos el campo y observamos las universidades, por ejemplo, de ambos lados del Mediterráneo, o las de ambos lados del Atlántico y Pacífico, concluyendo que las peculiaridades culturales y religiosas siguen influyendo en el mundo del pensamiento, quizá como no pueda ser de otra manera. Y quizá desde ahora y desde esta observación y su aceptación el mundo del conocimiento deba reafirmar lo que siempre ha conservado como su mayor patrimonio: su visión universal (universidad) y de respeto para todo ello (sabiduría).

Conforme a los datos que se disponen en publicaciones que se mencionan en la bibliografía y también se pueden ahora recoger en las páginas web de las correspondientes universidades se puede elaborar una tabla cronológica como la siguiente:

- 1787 Como señala Hernández-Pacheco (1944) vino desde la Europa del siglo XVIII la influencia de que los grandes museos que se estaban creando entonces en las capitales de las naciones, se consideraran también como centros de investigación y de enseñanza. Idea que recogió el Marqués de Floridablanca que dispuso, en 1787, que se fundasen en Madrid los estudios de Ciencias Naturales y que sus clases se impartieran en los locales del Real Gabinete de Historia Natural, entonces en la calle de Alcalá.
- 1799 Madrid, Real Decreto de 1799 por el que se disponían los medios para editarse la revista Anales de Ciencias Naturales, a cuyo frente se puso a José Clavijo Fajardo, director del Real Gabinete.
- 1813 A principios del siglo XIX se iniciaron reformas en la universidad española, buscando con ellas que, además de transmisora, fuera creadora de nuevos conocimientos pues ya parecía evidente que, durante buena parte de su recorrido, la universidad en España, más que la de contribuir en la investigación, desempeñó una función predominantemente docente (Gómez Oyarzún, 1998). Los primeros cambios fueron los que implantó la Junta Renovadora de la Instrucción Pública creada en 1813 y que supuso la implantación de un modelo "fotocopiado" o al menos muy semejante al francés. La reforma se haría instituyendo en Madrid una universidad central donde se realizarían todos los estudios que también se harían en las otras nueve universidades pero, además, se añadirían algunas cátedras nuevas entre ellas, y por primera vez, las de Exactas, Física y Naturales. Pero la reforma apenas duró un curso.
- 1821 Madrid, otro nuevo intento de renovación general en la Universidad Central hizo que se diesen enseñanzas de Mineralogía, para la que se asignaron dos cátedras, Las clases se impartirían en el Real Gabinete (Anónimo, 1945). El primer titular de la disciplina recayó en Donato García. Pero el curso tampoco terminaría, esta vez fue la entrada en España de las tropas francesas bajo el Duque de Angulema lo que acabó con el nuevo proyecto, y con la libertad de algunos de los profesores que trataban de llevarlo a cabo.
- 1839 Madrid, tras avatares en los que de nuevo la política estaba por medio, en 1839 echa a andar de nuevo el proyecto de la Universidad Central, aunque entonces los problemas de financiación y de locales eran evidentes.
- 1844 Madrid, desde el curso 1844-1845 la mayoría de las clases se imparten en el edificio de la Universidad de la calle Noviciado.
- 1846 Se inauguró en Oviedo en 1846 el Gabinete de Historia Natural, ocupando parte del edificio histórico de la Universidad de la calle San Francisco. Aunque existía ya un ánimo generalizado entre los ilustrados asturianos del XVIII para crear este centro, no fue hasta ese año cuando, por aplicación del Plan Pidal a la enseñanza, se pudo hacer realidad ese proyecto. Y también el de que los estudios de Ciencias se disgregaran como una sección independiente del resto de los estudios de la Universidad.

- 1848 Oviedo, se dota la primera cátedra de Historia Natural que ocupa L. Pérez de Salmeán.
- 1850 Madrid, se introdujo, entre otras, la nueva Sección de Ciencias Naturales ubicada a todos los efectos en el Real Gabinete de Historia Natural.
- 1857 Entra un nuevo Gobierno, con el general Narváez como Primer Ministro, y Claudio Moyano como ministro de Instrucción Pública. Éste reorganizó varias instituciones, entre otras el Real Gabinete. El Plan Moyano sale publicado en la Gaceta de Madrid el 22 de julio de 1857, pero sólo unos meses más duraría como ministro su creador. En dicha ley se prevé que las licenciaturas de Ciencias (Exactas, Físicas y Naturales) duren dos años, y el doctorado otros dos. Para el Bachillerato de las mismas ciencias se destinarían tres años, con un examen final que para el de Naturales consistiría en clasificar en tres horas, y pudiendo utilizar para ello libros, un objeto de Mineralogía, otro de Botánica y otro de Zoología.
- 1857 Madrid, al amparo del Plan Moyano, se funda la Facultad de Ciencias en la que se incluían los estudios de Ciencias Naturales.
- 1873 Juan Vilanova y Piera es el primer catedrático de Paleontología en España, en la Universidad Central.
- 1907 Se crea la Junta de Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE).
- 1910 Dentro de la JAE se crea el Instituto Nacional de Ciencias Físico-Naturales, a cuyo frente se coloca a Santiago Ramón y Cajal. Al Instituto están incorporados, entre otros centros, el Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- 1934 Oviedo, el edificio histórico de la Universidad y el Gabinete de Historia Natural son dinamitados. Sobreviven escasos restos de sus colecciones y biblioteca.
- 1939 La JAE pasa a ser el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- 1940 Oviedo, se dota la cátedra de Geografía Física y Geología Aplicada, que es ocupada por Noel Llopis Lladó.
- 1943 El 10 de abril se crea, dentro del CSIC, el Instituto de Investigaciones Geológicas "Lucas Mallada" para desarrollar los estudios geológicos. Se le hizo el encargo de su estructuración a Maximino San Miguel de la Cámara, ya en la Universidad de Madrid, quien propone varias denominaciones para el centro al entonces Secretario General del CSIC, J. M. Albareda Herrera; entre ellas éste reconoce el nombre de su paisano aragonés e ingeniero de Minas y sugiere que sea Lucas Mallada⁵ la denominación del nuevo centro. El Instituto "Lucas Mallada" no fue en principio un centro con sede ni personal investigador propios, lo constituyeron en sus inicios diversas personas ubicadas en las universidades españolas (Barcelona, Granada, Madrid, Oviedo), aunque todos ellos utilizaron el mismo

5. Lucas Mallada, Huesca, 1841-Madrid, 1921. Ingeniero de Minas, catedrático de Paleontología de la Escuela de Minas de 1879 a 1892. Autor del Catálogo general de las especies fósiles encontradas en España (1892) y de la Explicación del Mapa Geológico de España (1895 a 1911). También escribió el libro *Los males de la Patria* (1890), de gran interés social y humano.

nombre, además del de la universidad a la que pertenecían. Esta doble pertenencia o carácter mixto, se ha conservado para algunos de los centros segregados o derivados de aquel primigenio "Lucas Mallada". Tuvo como órgano de expresión la revista Estudios Geológicos, cuyo primer número se publicó en 1945 y en la actualidad es todavía una revista activa desde el MNCN.

- 1944 Madrid, se reorganiza la Facultad de Ciencias en cuatro secciones: Matemáticas, Físicas, Químicas y Naturales, ésta última en dos ramas, Biología y Geología.
- 1953 Madrid, se crea la licenciatura de Ciencias Geológicas.
- 1955 Granada, impulsado por José María Fontboté se crea la sección de Estratigrafía formando parte de la estructura del Instituto "Lucas Mallada".
Oviedo, se crea el Instituto de Geología Aplicada del CSIC.
- 1958 Madrid, se crea la sección de Ciencias Geológicas.
- 1964 Madrid, se crean, o se elevan a rango de secciones, las dos ramas de Naturales, que desaparece como tal. Se crea pues la sección de Ciencias Geológicas.
- 1965 Barcelona, se crea como centro propio del CSIC el Instituto Jaume Almera (IJA) que se ubica en el centro universitario de Pedralbes, Barcelona.
- 1968 Barcelona, se crea la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).
- 1971 Madrid, se crea el Instituto de Geología Económica, centro mixto UCM y CSIC, que se ubica principalmente en el departamento de Estratigrafía de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense.
- 1972 Barcelona, la UAB se traslada a sus nuevos edificios del Campus de Bellaterra. En ese año se inician también los estudios de su sección de Geológicas dentro del marco de la Facultad de Ciencias.
- 1975 Madrid, la Sección se transforma en Facultad de Ciencias Geológicas.
- 1983 Madrid, se reorganiza el Instituto de Geología Económica, UCM y CSIC, actualizando su reglamento y funcionamiento, ampliándose su ubicación a toda la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM.
- 1986 Granada, se crea el Instituto Andaluz de Geología Mediterránea (IAGM), centro mixto Universidad-CSIC.
- 1987 Oviedo, a raíz de la Ley Orgánica de Reforma Universitaria en 1983, nace la Facultad de Geología, recogiendo las disciplinas de Geodinámica, Paleontología, Petrología, Estratigrafía, Cristalografía y Mineralogía.
- 1993 Granada, El IAGM pasa a ser el actual Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, asimismo centro mixto Universidad- CSIC.
- 2001 Oviedo, se reinaugura el Museo de Geología, actualmente bajo la supervisión y control de la Facultad de Geología.

En la actualidad el título de licenciado en Geología se da en las siguientes universidades españolas: Barcelona (Autónoma y Central), Bilbao, Madrid (Complutense), Granada, Huelva, Oviedo, Salamanca y Zaragoza.

Instituto Geográfico Nacional

- 1870 Se crea el Instituto Geográfico en la Dirección General de Estadística del Ministerio de Fomento, siendo su primer director Carlos Ibáñez de Ibero. Con él se inicia el proyecto de cartografiar toda España a escala 1:50.000.
- 1873 Durante la Primera República se crea la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico.
- 1900 Se crea el cuerpo de Ingenieros Geógrafos.
- 1925 Pasa a denominarse Dirección General del Instituto Geográfico y Catastral.
- 1939 Se denomina Instituto Geográfico Catastral y Estadístico.
- 1968 Se publica el último Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000.
- 1976 Se aprueba el Reglamento de la Comisión Nacional de Geodesia y Geofísica.
- 1977 Se denomina Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
- 1987 Pasa a llamarse Instituto Geográfico Nacional.
- 1989 Se crea la Comisión Española de Geodesia y Geofísica.
- 2000 Se denomina Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
- 2004 El Instituto tiene como nueva competencia la "observación, vigilancia y comunicación de la actividad volcánica y determinación de riesgos asociados".

Otras instituciones

Hemos considerado anteriormente a las instituciones que son por su historia y por su volumen de personas las más importantes, pero es verdad que en España han existido otras instituciones de menor tamaño, a veces con carácter "local o regional" pero que han marcado o influido de manera destacada en la marcha de la historia de la geología española, de una forma desproporcionada a su tamaño, y que con ello evidencian sin duda la importancia y valor de los que trabajaron en ellas. Mucho hay que andar aún en la búsqueda de una completa relación de todas ellas, así que el listado siguiente debe ser considerado como un ensayo al que deberemos insertar próximamente otros nombres que ahora desconozco.

- 1776 La Sociedad de Amigos del País Bascongado funda el Seminario Patriótico de Vergara, del que serían profesores L. Proust y también Fausto de Elhuyar.
- 1792 Se crea el Real Seminario de Minería de México.
G. Melchor de Jovellanos consigue para Gijón la creación del Instituto de Náutica y Mineralogía. Estaba dotado con tres cátedras, una de las cuales era la de Mineralogía. Su inauguración tiene lugar en 1794 y estuvo ubicado en la casa que cedió para ese fin el hermano de Jovellanos. Hoy, el edificio es un hotel en cuya fachada se recuerda su origen por medio de una placa.

- 1874 Se funda el Gabinete de Ciencias Naturales del seminario de Barcelona bajo los auspicios de la Iglesia católica. Su nombre actual es Museo Geológico del Seminario de Barcelona.
- 1940 Se funda en Laxe una institución creada por Isidro Parga Condal, al ser expulsado entonces de la Universidad de Santiago de Compostela por sus ideas políticas. El Laboratorio Xeoloxico está ubicado en Castro O Sada (La Coruña).

Conclusiones

No hay muchos estudios sobre estos temas generales en los que se involucren las trayectorias de diversas instituciones geológicas que, como hemos visto, entretengan sus historias entre sí y, a su vez, con la general de España, consiguiéndose una complejidad que va en paralelo a la del país, y no sólo como puro reflejo, sino que estuvo muy dependiente de ella. La toma de decisiones respecto a la creación y el desarrollo y sostenimiento de los centros que se ocuparon de esta ciencia se encontraron muy subordinados a las voluntades de los administradores y autoridades, semejantes a las prácticas usuales en la vida, y cabe preguntarse hasta qué punto siguen estando presentes.

Es tentador, en base a este conjunto de fechas y datos expuestos, establecer fases o etapas diferenciadas y es seguro que son evidentes algunas de las propuestas por Gonzalo Gutiérrez (2000) pues hay fechas claves, hitos indiscutibles que marcan el trayecto señalando puntos de un antes y un después de ellos. Pero, en mi opinión, resultaría apresurado establecer o pretender determinar esas etapas, puesto que hay que tener en cuenta aun más variables de las que aquí se han dado, por ejemplo:

- ▶ Hay fechas determinadas en las que se crean asociaciones profesionales, sociedades privadas de geólogos, tales como la Real Sociedad Española de Historia Natural (1871); Sociedad Española de Mineralogía (1975); Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (1978); Sociedad Geológica de España (1985); Sociedad Española de Paleontología (1985); Sociedad Española de Geomorfología (1987), etc., que muy probablemente signen esos tiempos.
- ▶ La evolución de los hechos “favorables” o “contrarios” a alguna institución no parece coincidir con las del mismo carácter en otras, incluso aparentemente próximas en sus objetivos fundamentales.
- ▶ La cronología de los hechos, de las fechas de los decretos de creación o de cambios, son básicos desde luego y lo son asimismo los años en que España se encuentra en guerra ya sea en la de la Independencia frente a Napoleón o en la Guerra Civil, pero esa dependencia entre la historia general del país y la de la geología requiere ser ampliada hacia la de los países cercanos que tanta influencia han ejercido siempre sobre uno y otro aspecto.

- Cualquier conclusión debe ser cruzada con la de los propios avances en el conocimiento geológico tanto a escala nacional como a escala global.

Es quizá, por tanto, el momento de señalar sólo espacios críticos en líneas del tiempo con el objetivo, mantenido, de establecer una red multivariante más rica, más completa y seguramente más verdadera en la que alguna vez veamos ya con claridad periodos de auge y caídas, de concordancias de objetivos o de desarmonías en los mismos, con el objetivo de disponer de una historia y de aprender de ella para remediar los errores y hacer uso de las líneas de aciertos.

Hasta la llegada de esos resultados ideales, se pretende ofrecer, por medio de un esquema simple general, las correlaciones cronológicas que manifiestan esos hitos de fechas o acontecimientos más importantes. Así:

1752-1808 El Museo de Ciencias Naturales se crea y con numerosos altibajos consigue, al menos, mantenerse con cierta dignidad. En esa época es la institución más importante para el estudio de la geología.

1825-1936 El Museo tiene una importante decadencia y casi desaparece, pero al final de esa época recupera gran parte del terreno perdido. El IGME alcanza su auge, creciendo poco a poco hasta llegar a situarse en la que creo es su máxima cota, con ingenieros de minas como protagonistas. Las universidades tienen ya alguna clase de Mineralogía y Paleontología pero su estabilidad y desarrollo todavía están latentes.

1972-2006 En 1972, el IGME pone en marcha el Plan MAGNA. En las universidades, tanto en Madrid como en Barcelona, se amplían sus instalaciones, su personal, hay una explosión de alumnado y de profesores. En 1989 y 1991 las reformas llegan al Museo donde se remozan sus instalaciones y se incorporan también personal y equipamientos varios. Hay una incorporación de geólogos cada vez mayor en el IGME. En el bienio 2002-2003 se alcanzan en el ICOG el mayor número de visados de proyectos (Regueiro y González-Barros, 2006).

Los periodos de crisis que han tenido todas estas instituciones, aun siendo todas ellas importantes, nos advierten que los vaivenes de la historia son procesos reales. Así que el auge actual, en que sin duda se halla la profesión de geólogo, debería ir pareja al de las instituciones que lo arropan. Todos, instituciones, asociaciones y personas han dado señales inequívocas de que entrelazadas pueden dar respuesta a las necesidades que en determinados momentos la sociedad les demanda. Así que este puede ser el momento favorable para, precisamente a través de esas instituciones, adelantarnos a esas necesidades y hacer ver a la sociedad las posibles utilidades y beneficios que podemos ofrecerle. Quizá para todos éste sea el reto del futuro.

Referencias bibliográficas

Aguirre, E. (1992). Introducción. El Museo Nacional de Ciencias Naturales (1771-1935). Doce Calles, Madrid, 13-47.

Anónimo (1945). Breve reseña histórica de la Universidad de Madrid. Universidad de Madrid.

Ayala Carcedo, F. J. (1991). La aportación científica y tecnológica de Lucas Mallada. 150 Aniversario. Lucas Mallada. ITGE, Madrid, 3-12.

Barreiro, A. J. (1919). La historia natural en España durante el último tercio del siglo XVIII. Asociación para el Progreso de las Ciencias. Congreso de Bilbao, II, 31-55.

Barreiro, A. J. (1929). Un capítulo de la historia del Museo Nacional de Ciencias Naturales. Su fundación y primeros años (1771-1780). Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural, t. XV (Homenaje a D. Ignacio Bolívar), 143-154.

Barreiro, A. J. (1944). El Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC, Madrid.

Barreiro, A. J. (1992). El Museo Nacional de Ciencias Naturales (1771-1935). Doce Calles, Madrid, 55-348.

Fernández de Castro, M. (1874). Notas para un estudio bibliográfico sobre los orígenes y estado actual del Mapa Geológico de España. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España I: 17-68.

Fernández Pérez, J. (1993). Estudio preliminar. Anales de Historia Natural. 1799-1804. 1: 15-130.

Gómez Oyarzún, G. (1998). La Universidad a través del tiempo. Universidad Iberoamericana, México.

González-Bueno, A. (1999). El Real Gabinete de Historia Natural. Madrid, Ciencia y Corte. A. Lafuente y J. Moscosos (eds.), Madrid, 247-251.

González García, F. (1992). La investigación oficial. Suárez Fernández, L. y Gallego, J. A. (eds.). Historia general de España y América. La época de Franco. Ediciones Rialp, Madrid.

Gozalo Gutiérrez, R. (2000). Propuesta de periodización para la Geología y Paleontología españolas. Actes de les V Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica. Barcelona, 71-75.

Gutiérrez Claverol, M. y Rodríguez Gerente, L. M. (2005). Vicisitudes históricas del Museo de Geología de la Universidad de Oviedo. Trabajos de Geología. 25: 27-49.

Hernández-Pacheco, E. (1944). El Museo de Ciencias Naturales y sus naturalistas en los siglos XVIII y XIX. Barreiro, A. J. El Museo Nacional de Ciencias Naturales. 1-81. CSIC, Madrid.

Ibarra y Rodríguez, E. (1920). Origen y vicisitudes de los títulos profesionales en Europa (especialmente en España). Discurso leído ante la Real Academia de la Historia, 29 de febrero, Madrid.

IGME (2003). Mapa Geológico de España, MAGNA (1971-2003). Cartografía geológica de España a escala 1:50.000. DVD. IGME, Madrid.

Lucena Giraldo, M. (2001). La imagen de América en la España ilustrada. De la ambigüedad libresca al Real Gabinete de Historia Natural. Reales Sitios 148: 40-49.

Mesa López-Colomar, J. M. (2005). Las Ciencias Geológicas y la Universidad de Sevilla. Castrillo Martos, Manuel (coord.). Historia de los Estudios e Investigaciones en Ciencias en la Universidad de Sevilla. Universidad de Sevilla, Sevilla, 339-385.

Novo y Fernández Chicarro, P. de y Ortega Gasset, M. (1950). La minería española. Breve historia de la Ingeniería española. Dossat, Madrid, 129-154.

Peset, M. y Peset, J. L. (2001). Reseñas. Estudios de Historia Novohispana 25: 193-200.

Puche Riart, O. (2001). La geología. Ayala-Carcedo F. J. (dir.). Historia de la Tecnología en España. Valatenea, Barcelona, II, 659-670.

Regueiro y González-Barros, M. (2006). Geological legislation in Spain and geosciences job market trends. European Geologist 21: 34-37.

Ríos, J. M. (1959). Apuntes para una efemérides de la geología española hasta 1936. Notas y Comunicaciones. IGME 54: 3-30.

Virgili, C. (2003). Lyell. El fin de los mitos geológicos. Nívola, Madrid, 318 pp.

Reseña histórica de la profesión geológica en España

José Manuel Baltuille Martín

Jefe del Área de Infraestructura Minera del Instituto
Geológico y Minero de España (IGME)

Introducción

Siempre que alguien se enfrenta a la difícil labor de plasmar, en unas pocas líneas escritas, el devenir histórico de cualquier actividad humana, las posibilidades de quedarse, simplemente, en un cúmulo de obviedades, situaciones aisladas fuera de contexto o particularizaciones son enormes; con el peligro de que la instantánea que se plasma sea únicamente la interpretación, por parte del autor, de unos hechos que ha vivido total o parcialmente, pero de los que casi nunca dispone de la información completa.

Por ello, cuando la Junta de Gobierno del ICOG me solicitó un artículo sobre la historia de nuestra profesión, sentí dos sensaciones muy contrapuestas: por un lado, mucha satisfacción al haber sido elegido para ello y, por otro, una gran preocupación de no ser capaz de plasmar, fielmente, una historia de más de cuatro décadas y de la que la mayoría de los geólogos españoles hemos sido co-protagonistas en mayor o menor grado.

No obstante, la ventaja de peinar ya canas es que la vida te ha enseñado que sólo se aprende de aquellas actividades y situaciones donde existe un riesgo, y que son estas empresas las que te permiten almacenar conocimientos que te enriquecen y facultan para mejorar y crecer en tu devenir vital.

Por ello, y centrándonos ya en el tema del capítulo, el primer problema que el autor se encuentra es conceptualizar la acepción “profesión geológica” que, desde un punto de

vista semántico, puede parecer sencillo. Para ello buscamos en las páginas del Diccionario de la Real Academia Española, donde se define profesión como “empleo, facultad u oficio que cada uno tiene y ejerce públicamente”.

Según esto, si se atiende al primer y tercer concepto, empleo y oficio, no deberíamos utilizar, en propiedad, la denominación de geólogos hasta la constitución del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, en diciembre de 1978, pues dichos conceptos equivalen a la capacidad profesional, y ésta sólo se obtiene tras la inclusión del sujeto en el colegio profesional correspondiente.

Pero, ¿qué ocurre si tenemos en cuenta el concepto facultad, es decir el conocimiento y la habilidad para desarrollar una actividad? Si esto fuese así, tendríamos que reconocer como profesionales a todos aquellos que, bien por formación universitaria o de cualquier otro modo, hubiesen alcanzado un conocimiento profundo sobre las materias geológicas.

Cualquiera de las dos posibilidades plantean “luces y sombras” pero, mayoritariamente, más sombras que luces.

Si nos ceñimos a la primera, y reconocemos al colegio como el único órgano capaz de dar la capacidad profesional, ¿consideramos que todos aquellos que han cursado sus estudios y han desembocado al mercado laboral antes de que el ICOG se fundase eran, o éramos, intrusos profesionalmente?, personalidades de la talla de Alfonso Limón, José Torrubia, Juan Vilanova y Piera, José Macpherson, Salvador Calderón y Arana, Eduardo Hernández-Pacheco, José Royo Gómez, Juan Dantín Cereceda, Lluís Solé i Sabarís, Isidoro Parga Pondal, Bermudo Meléndez, Vicente Sos Baynat y tantos otros que, con su vida y trabajo, han colaborado al desarrollo de diferentes aspectos de la geología en nuestro país ¿no tienen capacidad profesional?

Pero, si atendemos a la segunda premisa, y el conocimiento y la habilidad en una técnica es la que dan el marchamo de profesionalidad, ¿es un zahorí un hidrogeólogo?, ¿un prospector puede plantear una campaña de exploración minera? o, lo que es más preocupante, ¿son acaso geólogos, prestigiosos ingenieros de minas como Joaquín Ezquerro del Bayo, Casiano de Prado o Guillermo Schulz, como algunos autores defienden (Ayala Carcedo, 1993)?

Todas estas cuestiones, que han quedado abiertas en los párrafos anteriores, son algunas de las dificultades que plantea hacer una reseña histórica de una profesión que, aunque joven, tiene el “inconveniente” de que es la nuestra. Hagamos, pues, una revisión de diferentes épocas históricas.

Antecedentes históricos (siglos XVII-XIX)

Durante este periodo de tiempo observaremos cómo la formación de nuestros protagonistas evoluciona desde un punto de vista simplemente “descriptivista”, con fuertes influencias de los clásicos y de la Iglesia, hasta una visión ampliamente naturalista y racional, donde ya se emplea una metodología, y la observación y la repetición de los hechos es consustancial a todos los trabajos.

Alfonso Limón Montero

Nacido en 1628 en la localidad de Puertollano (Ciudad Real), poseyó los títulos de doctor en Medicina y maestro de Filosofía, enseñando la primera de dichas ciencias en la Universidad de Alcalá de Henares.

En su principal obra, *Espejo cristalino de las aguas de España*, muestra ya técnicas basadas en la observación y en la experimentación, dejando de lado la nefasta costumbre de considerar documentos incontrovertibles las obras de los antiguos clásicos.

La metodología empleada se basaba en la observación directa de las diferentes aguas, y allí donde no podía acceder directamente enviaba un cuestionario, “a testigos de mayor excepción”, solicitando distintos datos sobre fuentes, manantiales y ríos; posteriormente analizaba dichas aguas, mediante el estudio del residuo seco que obtenía por destilación o evaporación lenta del agua (Limón Montero, 1979, 1697). Dando pruebas de una cultura típicamente científica, siempre que utilizaba un informe ajeno, citaba la procedencia del mismo.

Como esquema de circulación de las aguas, propone un modelo subaéreo, coincidente con las ideas aristotélicas y enfrentado a la ortodoxia de la época. Este ciclo del agua que Limón planteaba en su tiempo tiene bastante parecido con las ideas actuales (López Vera, 1982).

Por todas las características e innovaciones de su obra se puede considerar a Limón como un auténtico pre-ilustrado.

Aunque se desconoce el lugar de su fallecimiento, éste se establece entre 1679-1680, es decir unos 18 años antes de la publicación de su mejor obra.

Escribió las siguientes obras: *Tractatus de Urinis in Quatuor Disputationes divisus* (Alcalá de Henares, 1674), *Espejo cristalino de las aguas de España*, hermoseedo, y guarnecido, con el Marco de variedad de Fuentes, y Baños. Cuyas virtudes, excelencias, y propiedades

se Examinan, Disputan, y acomodan à la salud, provecho, y conveniencias de la vida humana (Alcalá de Henares, 1697).

Juan Vilanova y Piera

Nacido en Valencia en 1821, estudió Medicina y Ciencias Naturales en su ciudad natal, licenciándose en 1845. Se trasladó a Madrid para doctorarse y, aun cuando lo hizo brillantemente y sobresalió en el estudio de la Medicina, no tardó en abandonar aquella carrera para dedicarse exclusivamente a las Ciencias Naturales y a la enseñanza.

Después de haber hecho oposiciones a la cátedra de Zoología de la Universidad Central y a la de Mineralogía y Botánica de Barcelona, es pensionado por el Gobierno para ampliar sus conocimientos geológicos en el extranjero. Recorrió Europa durante cuatro años, en los cuales perfeccionó su formación geológica y sirvieron para enriquecer notablemente el Museo de Historia Natural de Madrid.

Una vez en España tomó posesión de la plaza de ayudante en el citado museo que había obtenido por oposición. Un poco más tarde, fue nombrado, también por oposición, catedrático de Historia Natural de la Universidad de Oviedo (1850).

En 1852 es nombrado catedrático, sin oposición, de Geología en la Universidad de Madrid, debido a los méritos que concurrían en su persona. Más tarde fue el primer catedrático de universidad titular de Paleontología, cuando al escindir en dos la cátedra que poseía, Geología y Paleontología, mantuvo esta última hasta su jubilación académica (1873).

El 12 de julio de 1849 se crea la Comisión para la Carta Geológica de Madrid y General del Reino que, al año siguiente, se transforma en la Comisión del Mapa Geológico de España. Vilanova colabora con la Comisión, desde 1855, en el estudio geológico de las provincias de Valencia y de Castellón, con unas condiciones de trabajo muy duras, pues el territorio investigado presentaba una fuerte epidemia de cólera. Más tarde realiza la memoria y el mapa de la provincia de Teruel (1863) e inicia la memoria de la provincia de Alicante, aunque no llega a terminarla (Truyols Santonja, 1993).

El estar dotado de una actividad incansable, que no le abandonó ni aun en la enfermedad cardiaca que acabaría con su vida, y de un fuerte amor por la ciencia, le valió recibir el honroso y merecido epíteto de "Padre de la Prehistoria española". Cuentan sus contemporáneos que postrado en un sillón durante todo el año anterior a su fallecimiento, dictaba a sus hijos el original de su Memoria geognóstico-agrícola y protohistórica de Valencia que se imprimió después de su fallecimiento, y hacía que sus alumnos

acudiesen a su casa a escucharle las clases de Paleontología, pues él, debido a la disnea no podía acudir al museo.

Su afán de investigación le llevó a recorrer muchas veces la Península, llevando siempre a cabo interesantes trabajos: “con un saco a la espalda y un martillo en la mano, trepando a las montañas, descendiendo a las simas, atravesando los ríos y estudiando detenidamente la Naturaleza, con un fervor y un entusiasmo que debían acompañarle toda su vida”.

Fue escritor amenísimo y de cuidado estilo literario, lo que facilitó la difusión de su ciencia. Perteneció a las academias de Ciencias, de Historia y de Medicina (1875). Fue socio fundador de las sociedades Española de Geografía y de la de Historia Natural (1871), de la que fue presidente (1878), de la Sociedad Española de Hidrología Médica (1877) y presidente honorario del Círculo Geológico Cuevoense, de Cuevas de Vera (Almería) (1878).

Es uno de los primeros investigadores en proclamar la autenticidad de las figuras rupestres de la Cueva de Altamira y de sostener la prioridad del cobre sobre el bronce en la prehistoria.

Tal es el respeto y la estima que despertaba entre sus diferentes colegas de profesión que a su muerte, acaecida en Madrid en 1893, en unas breves notas necrológicas recogidas en la Revista Minera, Metalúrgica y de Ingeniería, se pueden leer textualmente las siguientes palabras:

Ha fallecido en Madrid, a los setenta y dos años de edad, el infatigable propagandista de la Protohistoria y catedrático de la Facultad de Ciencias Sr. Vilanova, que regentando la cátedra de Paleontología últimamente, como antes explicó la de Geología, ha contribuido poderosamente a desarrollar entre los estudiantes de la Universidad la afición a una ciencia que estaba circunscrita antes al personal del Cuerpo de Ingenieros de Minas [...]

Entre sus principales obras citaremos: Memoria geognóstico-agrícola sobre la provincia de Castellón (Madrid, 1858). Premiada en la Academia de Ciencias; Memoria geognóstico-agrícola de la provincia de Teruel (1863); Reseña geológica de la provincia de Valencia (Madrid, 1872); Historia Natural (Barcelona, 1872-1876), obra en ocho volúmenes en la que Vilanova se encargó, además de la dirección del trabajo, de la redacción de los capítulos de geología y de paleontología; Observaciones y explicación del plan de una obra de Geografía Geológica (Madrid, 1876); Tratado de geología (Barcelona, 1878); Teoría y práctica de pozos artesianos y arte de alumbrar aguas (Madrid, 1880); Ensayo de diccionario geográfico-geológico (Madrid, 1884) y Memoria geognóstico-agrícola y protohistórica de Valencia (Madrid, 1893).

José Macpherson Hemas

Nace en Cádiz el 15 de julio de 1839, hijo de un comerciante escocés dedicado a prósperos negocios de exportación e importación, y de una distinguida dama gaditana, fallecida al nacer él.

De sus primeros 25 años de vida se conoce muy poco. Según Martín Escorza (1994), realizó sus estudios primarios en Cádiz, continuándolos después en Gibraltar.

Parece que su afición por la geología le sobreviene merced a su hermano Guillermo (14 años mayor), con el que iba al campo frecuentemente para realizar excursiones geológicas y antropológicas y que, posteriormente, se ve aumentada por la presencia de Domingo de Orueta y Aguirre, quien le inicia en los estudios geológicos de la serranía de Ronda (Barrera, 2002).

También se sabe con certeza que viajó a Francia y Suiza, en diversos y prolongados viajes, y que alternaba estas estancias con periodos de residencia en Sevilla. Merced a su holgada posición económica aprovecha sus viajes por Europa para trabar conocimiento con los procesos naturales, asistiendo a clases de química, mineralogía y otras especialidades geológicas, aunque no consta que obtuviese ninguna titulación académica (Martín Escorza, 1986; Barrera, op. cit.).

Tras su regreso a España, su interés se centra en la Petrografía y la Tectónica. La temática que más desarrolló fue la petrografía de rocas endógenas, preferentemente las peridotitas de Ronda, las rocas ígneas del norte de Sevilla y Cádiz, las rocas gallegas, las del Pirineo occidental y las del Sistema Central, concretamente los tipos plutónicos de la Sierra del Guadarrama.

Fruto de sus relaciones científicas con Antonio Machado y Núñez (abuelo de los poetas) fue su primera publicación titulada Método para determinar minerales, publicado en Sevilla en 1870. Gaditano de nacimiento, Machado había fundado en 1850, en la universidad hispalense de la que era catedrático, un conocido Gabinete de Historia Natural en cuya parte geológica colaboraba Macpherson.

En 1871, por iniciativa de un grupo de científicos naturalistas se constituye en Madrid la Sociedad Española de Historia Natural (SEHN). Entre sus socios fundadores se encuentra el geólogo Juan Vilanova, catedrático de Paleontología de la Universidad Central. José Macpherson colaboró intensamente durante toda su vida profesional tanto en las sesiones de la sociedad como en su revista, titulada Anales de la Sociedad Española de Historia Natural.

En diciembre de 1872, a propuesta de Juan Vilanova, Guillermo y José entran a formar parte de la SEHN. Unos meses antes se habían incorporado los naturalistas andaluces Antonio Machado (catedrático de Mineralogía de la Universidad de Sevilla), Juan Bautista Chape (catedrático de Ciencias Naturales del Instituto de Cádiz) y Domingo de Orueta. Igualmente se incorporó Giner de los Ríos y Manuel Fernández de Castro.

Puede observarse cómo, a comienzo de los años setenta, José Macpherson formaba parte de un grupo de naturalistas dedicados a la geología, entre los que estaban su hermano Guillermo, Domingo Orueta, en Málaga, Antonio Machado, en Sevilla, y Juan Vilanova, en Madrid (Barrera, op. cit.).

El 1 de abril de 1875 llega deportado a Cádiz, al castillo de Santa Catalina, Francisco Giner de los Ríos. En esta ciudad comienza a gestar el proyecto de lo que sería años después su gran obra, la Institución Libre de Enseñanza. Las dotes personales de Giner y su prestigio fueron, sin duda, un tremendo acicate en aquellos momentos críticos de la vida cultural andaluza. Machado, Macpherson y muchos científicos andaluces son seducidos por la metodología de Giner y pasan a ser sus colaboradores cuando, un año después de su destierro gaditano, funda la Institución Libre de Enseñanza en Madrid.

Macpherson se establece en Madrid a finales de 1875 y se dispone a colaborar con Giner y la Institución, para lo que contacta con alguno de sus discípulos andaluces, tal es el caso del joven Domingo de Orueta y Duarte, hijo de su buen amigo Domingo de Orueta y Aguirre. Otro alumno brillante fue Francisco Quiroga y Rodríguez, quien llegó a ser catedrático de Cristalografía de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Madrid, siendo ésta la primera cátedra de esa materia que se creó en Europa. Otra de las tareas ejecutadas por el personaje era acompañar a los alumnos y profesores en las excursiones que, por el Guadarrama, se organizaban en la Institución. También colaboró con donaciones para los laboratorios de Química y Física de la Institución.

Su ejemplo como profesor, como colaborador y su generosidad, incluso económica, permitieron que se le dedicara, en el edificio de la Institución, el pabellón "Macpherson".

Su residencia definitiva en Madrid fue un hotelito, al final del paseo de la Castellana que, según Hernández-Pacheco (1927), transformó en un auténtico centro de investigación:

Era un verdadero laboratorio geológico, con biblioteca bien surtida de obras especiales, mapas y las revistas más importantes de geología; junto a la biblioteca estaba el pequeño gabinete de trabajo, con luz adecuada para la observación microscópica; otras dependencias eran el laboratorio fotográfico, pues Macpherson era excelente fotógrafo, y el taller de petrografía;

ocupando las colecciones mineralógicas, litológicas y paleontológicas, una pequeña construcción en el jardín, en el que estaba instalado un observatorio meteorológico [...]

Grandes son los contactos que, en el ámbito de la geología, estableció durante sus múltiples viajes: Pisani (mineralogía), Meunier (petrología), Suess (estructuralista) o Herbert (paleontología).

Este sabio y amigo entrañable de sus amigos muere en su vivienda de San Ildefonso de la Granja (Segovia) el 11 de octubre de 1902, manteniendo su etiqueta de haber sido un hombre bueno (Rodríguez Mourelo, 1902): "Ha pasado su vida haciendo el bien en la más grande acepción que a esta sublime palabra puede darse".

Su bibliografía consta de 38 publicaciones que, mayoritariamente (26), están recogidas en los Anales de la Sociedad Española de Historia Natural, de la que fue presidente en 1880, aunque también publicó en revistas portuguesas, francesas y belgas. Como peculiaridad de su bibliografía hay que destacar que, en la totalidad de su obra, consta como único autor.

Fue maestro de discípulos que han sido geólogos insignes de la época: Salvador Calderón, Eduardo Hernández-Pacheco, etc., pero su redacción farragosa y, a veces, poco clara han impedido crear un cuerpo doctrinal a la escala que su aportación merecía.

En 1927 tuvo lugar en Cádiz el XI Congreso Hispano-Luso de la Asociación para el Progreso de las Ciencias. Durante el mismo se rindió un homenaje a Macpherson con colocación de una lápida en la casa donde había nacido, en la plaza de la Mina, 12, edificio actualmente desaparecido y frente al cual, en los jardines existentes en la plaza, se encuentra un busto de este ilustre geólogo.

Periodo 1900-1939. El desarrollo de nuestros 'clásicos'

El inicio del siglo XX supone un despegue de los trabajos geológicos y del impulso de los mismos gracias a un plantel brillantísimo de geólogos que, desde el ámbito de la universidad preferentemente, pusieron los cimientos para el desarrollo de la geología española reciente. No obstante, el desencadenamiento de la Guerra Civil (1936-1939), supuso un fuerte freno al crecimiento de las expectativas que podían esperarse gracias a la calidad de aquellos profesionales, entre los que se podrían citar a Eduardo Hernández-Pacheco, Juan Dantín, Maximino San Miguel de la Cámara, José Royo, Vicente Sos Baynat, Francisco Hernández-Pacheco e Isidoro Parga, entre otros.

Por limitaciones de extensión del trabajo, nos referiremos únicamente a un par de estos insignes geólogos.

Eduardo Hernández-Pacheco y Estevan

Nacido en Madrid el 23 de mayo de 1872 en el seno de una familia de gran tradición y prestigio en la carrera de las armas, rápidamente se retiran hacia tierras extremeñas de donde eran originarios. Cursó la primera enseñanza en la escuela municipal de Alcuéscar (Cáceres), el bachillerato en el instituto de Badajoz, viajando más tarde a Madrid donde se licenció en Ciencias Naturales con Premio Extraordinario (1894) y se doctoró en 1896 (Barrera, 2000). Fue discípulo de Calderón y para terminar su tesis, debido a la clausura de la sección de Naturales de la Facultad de Ciencias (en la calle Alcalá), tuvo que solicitar la ayuda de Macpherson quien, gustosamente, le dejó utilizar su laboratorio particular y poder terminar así su tesis (Martín Escorza, 1987).

Durante 1896-1898 es profesor auxiliar en el instituto de Cáceres y ayudante de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid. Gana por oposición la plaza de catedrático de Historia Natural del instituto de Córdoba (1899), donde realiza una gran labor pedagógica y de respeto y aproximación a la naturaleza, no sólo entre sus alumnos sino entre la sociedad cordobesa en general, como así lo atestiguan el Centro de Excursiones y la Sociedad de Expansión de la Enseñanza que se crearon durante su estancia en la capital andaluza. Esta profunda comunicación con la sociedad que le rodeaba le lleva hasta la tenencia de alcaldía de Córdoba, fugaz y único cargo político que tuvo en su vida.

En 1907 es nombrado, en comisión de servicio, adjunto al Museo Nacional de Ciencias Naturales y la Real Sociedad Española de Historia Natural le designa para acompañar al profesor Calderón a las Canarias orientales, publicando una extensa monografía como resultado de sus estudios.

Obtiene la cátedra de Geología de la Universidad Central de Madrid (1910) mediante oposición, siendo nombrado ese mismo año jefe de la sección de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales.

Es en su labor didáctica en el museo donde desarrolla su particular técnica de la enseñanza de la Geología entre sus discípulos. Consistía ésta en plantear a sus alumnos un tema o una problemática a desarrollar. En una etapa preliminar él era el encargado de llevar la iniciativa de la investigación y dictar las normas a desarrollar para su resolución pero, cuando los alumnos empezaban a captar sus enseñanzas y se les veía capaces de vislumbrar la solución, el profesor se retiraba poco a poco dejando que ésta fuera alcanzada por el grupo de alumnos (anónimo, 1954).

En la década de 1910, el principal problema científico existente en el campo de la estratigrafía era el de la determinación exacta de los depósitos terciarios de las grandes cuencas internas españolas, en su mayoría miocenos, la caracterización de sus facies y las condiciones paleoclimáticas existentes durante su deposición. El origen de estas extensas cuencas era, mayoritaria y oficialmente, asignado a la existencia de grandes lagos, de dimensiones similares a las ocupadas por los actuales depósitos, siguiendo ideas de los autores de finales del siglo XVIII (Ezquerro del Bayo, 1845).

En diciembre de 1911, a causa de la aparición de abundantes restos fósiles de mamíferos y otros vertebrados en las obras realizadas en una arcillera o "barredo" del cerro del Cristo del Otero (Palencia), el Museo Nacional de Ciencias Naturales encarga al profesor Hernández-Pacheco y a su ayudante, Juan Dantín Cereceda, el estudio de dicho yacimiento. Ello va a suponer un descubrimiento de primera magnitud para el conocimiento del Mioceno de la cuenca del Duero, tanto en el campo paleontológico como en el estratigráfico.

A la luz de este hecho hay que destacar los trabajos de Dantín Cereceda (1912), quien constata la presencia en el yacimiento de Mastodon (Tetrabelodon) y de Hernández-Pacheco (1912), capaz de valorar el significado que va a tener el descubrimiento para el conocimiento de los depósitos del terciario continental español.

Un año más tarde, Hernández-Pacheco publica Los vertebrados terrestres del Mioceno de la Península Ibérica (1913), donde pasa revista al conocimiento existente sobre otros yacimientos españoles de mamíferos terciarios para compararlo con los datos que va aportando el cerro del Cristo del Otero. En este trabajo propugna la utilidad de los vertebrados para datar las formaciones terciarias continentales en detrimento de los moluscos, debido al gran área de dispersión vertical que alcanzan éstos y al mal estado en que suelen encontrarse sus moldes.

Pensionado por la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, organismo creado en 1910, entre 1911 y 1912 viajó por el extranjero, ampliando estudios en diferentes centros de Francia, Bélgica, Italia y Suiza. A la vuelta de su viaje, y tras haber creado el Marqués de Cerralbo la Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas, dentro del ámbito de la Junta, se le designa jefe de Trabajos de la Comisión y director de publicaciones, y es elegido vocal técnico de la Junta Central de Parques Nacionales (1917).

En 1923 es nombrado catedrático de Geografía en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Madrid, desde donde colaborará al desarrollo de la fisiografía y la geografía física en el país. Ese mismo año es nombrado director de la Comisión de

Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas.

En 1926, y en calidad de vocal de la Junta organizadora y director de Excursiones, colabora en la realización del XIV Congreso Geológico Internacional de Madrid. Ese mismo año es nombrado, por el Ministerio de Fomento, asesor de la Comisión de estudios geológicos para la construcción de obras hidráulicas, dependiente de la Dirección General de Obras Públicas.

En reconocimiento a su labor en favor de la protección de la naturaleza es nombrado delegado-inspector de Sitios y Monumentos Naturales de Interés Nacional, dependiendo de la Comisaría de Parques Nacionales (1929). En 1934 es elegido, a propuesta unánime del Claustro, vicerrector de la Universidad de Madrid y vocal del Consejo Nacional de Cultura.

A partir de la década de los treinta comienza a mostrar un gran interés por los territorios africanos de influencia española. Dirige varias expediciones científicas a Ifni (1934) y, en compañía de su hijo Francisco, investiga el territorio del antiguo Sáhara español (1941). Para continuar estos estudios saharianos se constituyó, en los laboratorios de Geología y Geografía Física del Museo Nacional de Ciencias Naturales, una Comisión de Exploraciones y Estudios Africanos integrada por el profesor Hernández-Pacheco, Hernández-Pacheco (hijo), Vidal Box, Alía Medina y Guinea López (Anónimo, op. cit.).

En 1965, siguiendo la tradición familiar, se retira a Alcuéscar (Cáceres) donde fallece a la edad de 93 años.

Entre los méritos y honores recibidos a lo largo de su amplia carrera profesional, destacaremos: miembro numerario de la Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba (1904), correspondiente de la Real Academia de Historia de Madrid (1916), presidente de la Real Sociedad Española de Historia Natural (1917), correspondiente de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona (1920), académico de la de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (1921), presidente de la sección de Geografía Física y Geología de la Real Sociedad Geográfica de Madrid (1928), medalla de oro del Mérito Provincial, otorgada por la Excm. Diputación provincial de Cáceres (1931), vicepresidente del Ateneo Científico, Literario y Artístico de Madrid (1932), presidente de la sección de Ciencias Naturales de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias (1935), miembro académico del Instituto de España (1938), presidente de la Sociedad Española de Alpinismo "Peñalara" (1938), vicepresidente de la Real Sociedad Geográfica de Madrid (1940), presidente de la sección de Naturales de la Real

Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (1940), Doctor "Honoris Causa" por la Universidad de Toulouse (1952).

De igual forma perteneció a varias sociedades científicas extranjeras y participó, como representante nacional, en infinidad de congresos y reuniones científicas de ámbito internacional. Asimismo, fue colaborador de la *Revue de Géologie*, *Revue Anthropologique*, etc.

Sus trabajos están orientados hacia el conocimiento histórico-natural de la península Ibérica, existiendo dos vertientes en su obra: la geológica y la prehistórica.

Entre sus publicaciones de temática geológica pueden señalarse: Estudio geológico de la Sierra de Montánchez (Madrid, 1896), Tesis Doctoral; Excursión a Laguna de Duero (provincia de Valladolid) (Madrid, 1900); Consideraciones respecto a la organización, género de vida y manera de fosilizar de algunos organismos dudosos de la época silúrica y estudio de las especies de algas y huellas de gusanos arenícolas del Silúrico inferior de Alcuéscar (Cáceres) (Madrid, 1908); Estudio geológico de Lanzarote y de las islas Canarias (Madrid, 1909); Elementos geográficos-geológicos de la península Ibérica (Madrid, 1911); Itinerario geológico de Toledo a Urda (Madrid, 1911); Importancia del descubrimiento del *Mastodon angustidens* en el cerro del Cristo del Otero (Palencia) (Madrid, 1912); Los vertebrados terrestres del Mioceno de la Península Ibérica (Madrid, 1913); Geología y paleontología del Mioceno de Palencia (Madrid, 1915); La mandíbula neandertaloide de Bañolas, en colaboración con Obermaier (Madrid, 1915); Compendio de Geología (1916); Mineralogía, geología y prehistoria del Cerro de los Ángeles (Madrid), en colaboración con Royo y Gómez (Madrid, 1916); Acerca del yeso del Cerro de los Ángeles, en colaboración con Royo y Gómez (Madrid, 1917); Hallazgo de tortugas gigantes en el Mioceno de Alcalá de Henares (Madrid, 1917) y *Les Archæocyathidæ* de la Sierra de Córdoba (Espagne) (París, 1918).

José Royo Gómez

Nace en Castellón de la Plana el 14 de mayo de 1895, estudia la carrera de Ciencias Naturales en la Universidad Central de Madrid, doctorándose en dicha especialidad.

Se formó científicamente a la sombra del Laboratorio de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales. Fue discípulo de los profesores Fernández Navarro y Hernández-Pacheco, y en especial de este último, con quien se formó en el estudio de los problemas que presentaban, y aún hoy presentan, las grandes extensiones de depósitos terciarios confinados en las grandes cuencas interiores de la Península y quien dirigió su tesis doctoral titulada: *El Mioceno continental Ibérico y su fauna malacológica* (1922).

Pero la personalidad científica de José Royo debe estudiarse, en primer lugar, como profesor de Geología. Entre 1916 y 1918 desempeña el cargo de ayudante de la cátedra de Geología de la Universidad Central para, posteriormente, y mediante oposición, ser nombrado colector y preparador del Museo Nacional (1917-1922).

Cuando en 1912 es creada en el seno de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas la Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas decide ingresar en ella, haciéndolo como ayudante técnico (1918) y donde permanecerá hasta 1928.

En 1922 alcanza por oposición el puesto de profesor de Geología y Mineralogía del Museo Nacional de Ciencias Naturales, puesto que conservará hasta 1939. Allí impartió el llamado Curso práctico de Geología dirigido a estudiantes y licenciados en Ciencias Naturales, alumnos de Farmacia, de escuelas especiales de ingenieros y de la Escuela Superior de Magisterio (Sos Baynat, 1962).

En 1925, pensionado por la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, realiza un viaje de estudios de cuatro meses de duración por Alemania (Academia de Múnich, Museo de Stuttgart, Museo de Historia Natural de Gotinga, Museo Provincial de Hannover); Bélgica (Museo de Historia Natural de Bruselas); Francia (Laboratorio de Geología de la Facultad de Ciencias de Lyon, Escuela de Minas de París, Museo de Ciencias Naturales de París, Facultad de Ciencias de París) y Suiza (Museo de Historia Natural de Ginebra, Politécnico de Zúrich).

Participa activamente en el XIV Congreso Geológico Internacional de 1926 como secretario de la Sesión II del mismo, siendo líder de la excursión A-6 por el Terciario de la provincia de Burgos y delegado de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias en el Congreso.

Su vida profesional está muy ligada al Instituto Geológico y Minero de España con el que empieza a colaborar en 1927 para la confección del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, realizando diversas hojas geológicas (Alcalá de Henares, Algete, Madrid). En la Memoria correspondiente a la hoja geológica de Alcalá de Henares, la primera de la serie en publicarse y sin duda una de las más completas en cuanto a técnicas y equipo se refiere, Royo establece las bases modernas de la interpretación del relleno de la cuenca de Madrid, y, por extensión, de las cuencas terciarias peninsulares (Sos Baynat, op. cit.).

Como hombre comprometido con su entorno, tanto científico como social, le preocupa el intenso devenir político de la sociedad que le toca vivir, es elegido diputado a Cortes Constituyentes en 1931 por Acción Republicana (Ordóñez Delgado, 1994).

Su gran labor como geólogo le es reconocida a nivel político, al ser nombrado subsecretario del Ministerio de Industria con Plácido Álvarez Buill como ministro de Industria y Comercio del Gobierno Casares Quiroga, a raíz de la Ley de Reorganización Ministerial del 1 de agosto de 1935. En dicha reorganización pasaron a depender, directamente de la subsecretaría, las competencias de la Dirección General de Minas. Esta dependencia directa dificultaba la tramitación de los diversos expedientes y asuntos mineros por lo que se restableció de nuevo la Dirección General (26 de junio de 1936), siendo designado José Royo como Director General de Minas, cargo que ocupa hasta 1937.

El nombramiento del eminente geólogo así como su labor al frente de la Dirección General no fue demasiado aplaudida entre el colectivo de minas (López de Azcona, 1988):

Es designado para el cargo José Royo Gómez, continuando la misma política iniciada en la subsecretaría de enemistad hacia el colectivo de minas, con una funesta acción en el campo de la minería y mineralurgia y, principalmente, contra el Instituto Geológico y Minero de España, del que era colaborador [...]

En 1938 es elegido vicesecretario de la Junta para Ampliación de Estudios, abandonando el país en 1939 al ser derrotado por las armas el Gobierno de la República y finalizar la Guerra Civil española.

Comienza así un largo exilio en el que jamás dejó de pensar en España a la que tanto amaba. Su diáspora comienza en Colombia donde vivió entre 1939 y 1951 y continuó en Venezuela donde le sobreviene la muerte en 1961.

A pesar de estos crueles avatares su actividad profesional no decae y funda el Servicio Geológico Nacional que depende del Ministerio de Minas y Petróleos, donde es profesor de Geología y Paleontología entre 1939 y 1951. Continúa su carrera docente con desbordante intensidad y así es nombrado profesor de Geología y Paleontología del Cuaternario del Instituto de Etnología de Bogotá (1946-1951); profesor de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional (1947-1951); profesor titular de Geología de la Escuela de Geología, Minas y Metalurgia en Caracas (1951-1961); profesor de Geología y Mineralogía en el Instituto Pedagógico de Caracas (1952-1961); encargado por el Ministerio de Educación Nacional para redactar los programas de Geología y Mineralogía que habían de regir en todas las universidades e institutos de Venezuela (1955); encargado del cursillo de Geología Militar, especialidad de Ingeniería en la Escuela de Infantería (Ingeniería Militar) de Caracas (1956-1961); profesor de Geología de la sección de Geografía de la Facultad de Humanidades de la Universidad Central

de Caracas (1956-1961). A su muerte, el 30 de diciembre de 1961, el Museo de la Escuela de Geología, Minas y Metalurgia de Caracas pasó a denominarse Museo Doctor Royo y Gómez, como homenaje perpetuo a su memoria.

Fue miembro de diversas sociedades y academias tanto nacionales como extranjeras: Real Sociedad Española de Historia Natural (1914-1939) y secretario de la misma (1918); Société Géologique de France (1924-1961) y su vicepresidente en 1927; Ateneo Científico y Literario de Madrid (1930-1939) del que llega a ser secretario de la sección de Ciencias; Sociedad de Ciencias Naturales de Bogotá (1941-1961) en la que ostenta la presidencia entre 1945 y 1947; Instituto Colombiano de Petrografía (1942-1961); American Geographical Society de Nueva York (1948-1961); Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (1945-1961); Paleontological Research Institution de Nueva York (1948-1961); Paleontological Society y Society of Vertebrate Paleontologists de Estados Unidos (1948-1961); Society of Economic Paleontologists and Mineralogists de Tulsa (1950-1961); Asociación Venezolana para el Avance de las Ciencias (1953-1961); Sociedad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela (1957-1961); American Polar Society (1957-1961); American Association for the Advancement of Science de Washington (1957-1961) y Society for the Study of Evolution de Chicago (1958-1961).

Entre sus 234 publicaciones, son dignas de especial mención las siguientes: Mineralogía, geología y prehistoria del Cerro de los Ángeles (Madrid), en colaboración con el profesor Hernández-Pacheco (Madrid, 1916); Acerca del yeso del Cerro de los Ángeles, en colaboración con el profesor Hernández-Pacheco (Madrid, 1917); Datos para la geología de la submeseta del Tajo (Madrid, 1917); Pedernales tallados del Cerro de los Ángeles, en colaboración con el profesor Hernández-Pacheco (Madrid, 1917); Nuevos datos para la geología de la submeseta del Tajo (Madrid, 1918); La sierra de Altomira y sus relaciones con la submeseta del Tajo (Madrid, 1920); Los yacimientos weáldicos del Maestrazgo (1920); La facies continental en el Cretácico inferior ibérico (Oporto, 1921) y Los peces fósiles de los Aljezares de Teruel (Madrid, 1921).

La década de los sesenta. Fin de una época y nacimiento de las primeras estructuras asociativas

Tras la finalización de nuestra Guerra Civil, el panorama de la sociedad española era, a todas luces, aterrador. El entorno de las ciencias geológicas, como cualquiera de las actividades del país, se vio afectado por las consecuencias que el desastre de la confrontación había supuesto en todos los ámbitos de la nación. La represión, la emigración, la censura, las directrices oficiales y el miedo son algunos de los efectos que desprende una forma autoritaria de gobernar que llega, en esos primeros años, a todos

y cada uno de los rincones de la sociedad española y afecta a cualquiera de los diferentes elementos de la vida nacional.

Con la economía nacional derrumbada se produce una caída de la investigación minera del país y, por ello, una detención en el desarrollo de las ciencias geológicas. El IGME, en 1940-1941, prepara un Plan de Investigación Minera de ámbito nacional que favorezca la reactivación del sector; pero el estallido de la conflagración europea, obligó a minimizar su contenido y reorientarlo hacia la prospección de minerales estratégicos para los contendientes.

Las penurias que sufría la sociedad española, acentuadas por su aislamiento político, se magnifican al ser uno de los pocos países europeos que, sin haber entrado en el conflicto directamente, no se beneficia de los planes económicos y de desarrollo que se generan al finalizar la Segunda Guerra Mundial y que, durante la década de los cincuenta, permiten la reconstrucción del continente europeo.

La sociedad española alcanza la década de los sesenta totalmente desestructurada y compartimentada, sin unas mínimas garantías democráticas y con una corrupción administrativa y política asfixiante. Por ello, era imprescindible aprovechar los escasos cauces de libertad, expresión y desarrollo que el sistema dejaba, tanto a nivel político como profesional.

A finales de la década, el régimen abandona su marcado desinterés hacia la investigación minera y comienza a crear una verdadera planificación que permita ordenar y desarrollar dicho sector. El vehículo empleado es el II Plan de Desarrollo Económico y Social (1968-1971) que, en su artículo 6, contempla la elaboración de un Plan Nacional de Investigación Minera (PNIM) que se crea en 1969.

Este plan representa una ayuda inestimable para el desarrollo de la profesión geológica pues, al estructurarse en diversos planes sectoriales de infraestructura geológica, recursos minerales, aguas subterráneas, geotecnia, mecánica de rocas y explotación de la plataforma marina, supone la necesidad de contratar un mayor número de geólogos en las empresas que van a participar en el PNIM. El desarrollo de dicho plan se le encarga al IGME, por parte del Ministerio de Industria, al iniciarse el III Plan de Desarrollo Económico y Social (1972).

Es, en este entorno político, económico y temporal, cuando un grupo de compañeros del mundo universitario y del empresarial deciden aprovechar la Ley de Asociaciones, de 24 de diciembre de 1964, para constituir el germen de nuestra primera estructura profesional: la Asociación de Geólogos Españoles (AGE), cuyo nombre aún hoy produce

un sentimiento compartido de alegría profunda y de nostalgia, entre los compañeros que ya pasamos la barrera de la cincuentena.

Los Estatutos de la Asociación, firmados por Bermudo Meléndez y Emiliano Aguirre entre otros, son presentados el 24 de febrero de 1968 y aprobados el 14 de marzo de 1970.

Los fines de la Asociación quedan perfectamente definidos en el artículo 2 de sus Estatutos:

El fin principal de la Asociación es el de ser cauce y medio de unión entre los Geólogos españoles y procurar la realización de sus legítimas aspiraciones, para lo cual:

- a) Mantendrá y fomentará el espíritu de compañerismo entre los Geólogos.
- b) Asesorará a sus asociados sobre las materias propias de la profesión y aquellas que se consideren oportunas.
- c) Defenderá y hará valer los derechos, en particular los profesionales, de los asociados y de todos los Geólogos.
- d) Fomentará la investigación en el campo de la Geología.
- e) Se ocupará de la formación de los Licenciados y Doctores en Geología y de la eficacia de sus trabajos.
- f) Publicará las revistas científicas que sean necesarias y procurará poner a disposición de los Geólogos españoles las publicaciones españolas y extranjeras.
- g) Promoverá e impulsará la creación de Colegios Profesionales de Geólogos.
- h) Servirá de enlace entre los Geólogos españoles.
- i) Será medio de relación entre los Geólogos españoles y los del resto del mundo.
- j) Velará por la Ética Profesional.
- k) Atenderá, a través de su Mutuality, a las necesidades de sus asociados.

Por tanto, la AGE se constituye con una voluntad clara y rotunda de ocupar el puesto que, en otras profesiones de la época, desempeñaban los colegios profesionales existentes. Lo atestigua su voluntad de defender los derechos profesionales de los asociados, velar por la ética profesional, facilitar la formación a los geólogos, fomentar el compañerismo y promover e impulsar la creación de Colegios Profesionales de Geólogos.

Y, respecto al término geólogo, el artículo 74 lo precisa, nítidamente, a la hora de establecer los requisitos para ser miembro de la Asociación:

Serán miembros numerarios de la Asociación los españoles que posean el título de Doctor o Licenciado en Ciencias Geológicas, así como los Licenciados en la antigua Sección de Ciencias Naturales que hayan obtenido el título de Doctor en Ciencias Geológicas o en Ciencias Naturales con tesis Geológica o que acrediten, suficientemente ante la Asociación, su especialización en esta rama; que lo soliciten.

No obstante, el trabajo del AGE no fue fácil ni gratificante, pues el colectivo no contaba con ningún apoyo exterior. Dada su falta de experiencia política y de representación institucional no encontraba cauces para dialogar con la Administración española y, además, contaba con la oposición frontal y dura de algunas profesiones establecidas que veían en los geólogos nuevos competidores, con una mejor y más completa formación.

Pero era tal la ilusión del colectivo por situar a la profesión en el lugar que le correspondía en la sociedad española que, a pesar de su juventud, lo que impedía el sentimiento corporativo en ella, y las formas de desarrollar nuestro trabajo, tan poco convencionales para la época, y que facilitaban un alto grado de individualismo entre sus miembros, se despertó tal entusiasmo e interés entre el colectivo, tanto en la universidad como en las empresas, que la integración fue mayoritaria dentro de la Asociación.

Durante su existencia activa (1970-1978), la Asociación de Geólogos Españoles publicó tres anuarios: 1971, Apéndice 1973 al Anuario 1971 y 1978. El número de asociados numerarios que aparecen en ellos es el siguiente: 505 (1971), 542 (1973) y 957 (1978).

Para valorar estas cifras en su contexto real hay que comparar los 957 asociados de 1978 con los 1.058 del primer Anuario del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos en 1986, es decir, un centenar más después de ocho años.

En la Asociación figuran nombres como Francisco Hernández-Pacheco y de la Cuesta (asociado n.º 46), Vicente Sos Baynat (n.º 445), Bermudo Meléndez Meléndez (n.º 67 y presidente de Honor del AGE), Lluís Solé i Sabarís (n.º 335), José María Fúster Casas (n.º 28), Carmina Virgili Rodón (n.º 363), Manuel Alía Medina (n.º 5), Oriol Riba Arderiú (n.º 84), José Ramírez del Pozo (n.º 172), Inmaculada Corrales Zarauza (n.º 21), José María Fontboté Mussolas (n.º 293) entre otros, que representan lo más distinguido de la profesión geológica de la última mitad del siglo XX.

Es de justicia tener un recuerdo de agradecimiento para aquellos compañeros, algunos ya desaparecidos, encargados de presidir la asociación durante su corta vida: Antonio de Acha y Aracama (1970-1972), Fernando Rambaud Pérez (1972-1974), Jaime Assens Caparrós (1974-1976) y Santiago Leguey Jiménez (1976-1978).

El principal objetivo de la Asociación fue preparar el camino para conseguir que la Administración reconociese a la profesión de geólogo los mismos derechos que cualquiera de las profesiones colegiadas. Para ello, hubo que esperarse hasta la promulgación de la Ley 2/1974 de Colegios Profesionales, de 13 de febrero, donde, mediante una legislación única, se reglamentó una serie de normas y disposiciones dispersas de distinto rango que regulaban, hasta entonces, las profesiones colegiadas (Baltuille Martín, 1999).

El artículo 1 de la Ley define los Colegios Profesionales como:

Corporaciones de derecho público, amparadas por la ley y reconocidas por el Estado, con personalidad jurídica propia y plena capacidad para el cumplimiento de sus fines.

y en el artículo 3 se recogen los fines de los Colegios:

Son fines esenciales de estas Corporaciones la ordenación del ejercicio de las profesiones, la representación exclusiva de las mismas y la defensa de los intereses profesionales de los colegiados [...]

Los contactos de la AGE ante los diferentes grupos parlamentarios, tratando de obtener apoyos para la consecución del Colegio, fueron muy intensos. Casi siempre esa aproximación se basaba en contactos personales de los diferentes integrantes de la Junta o de personas próximas a la misma. Así se consigue que se tramite un primer proyecto de ley que se inserta en el Boletín Oficial de las Cortes de 1 de junio de 1977, el último publicado de las Cortes pre-constituyentes.

Debido a la convocatoria de elecciones a Cortes Constituyentes, el 15 de junio de 1977, hubo que volver a enviar el proyecto y haciendo una transcripción literal del anterior se remite al nuevo Parlamento, recogiendo en el Boletín Oficial de las Cortes de 20 de abril de 1978.

El proyecto de ley se estudió en la Comisión de Industria y Energía, cuyo presidente era el diputado Josep María Triginer Fernández (PSC-PSOE, diputado por Barcelona). Entre los diputados que integraban la Comisión, más de una veintena, los más activos fueron Carlos Gila González (UCD, diputado por Segovia), Juan Antonio Gómez Angulo (UCD, diputado por Almería) y Francisco Bustelo García del Real (PSOE, diputado por Pontevedra); aunque nombres como: Juan Ajuriaguerra Ochandiano (PNV), Maciá Alavedra i Moner (Grupo Catalán), Antonio Carro Martínez (AP), Javier Solana Madariaga (PSOE) o Ramón Tamames Gómez (PCE), que jugaron un papel protagonista en la transición política española, también formaban parte de dicha Comisión.

La AGE, tras haber consensuado los apoyos suficientes con el partido en el poder, a través del señor Gila, y con la oposición, señor Bustelo, pensaba que el proyecto de ley saldría sin mayores problemas; pero entonces ocurrió algo que en la época fue común y que, con el tiempo, fue una de las causas que dio al traste con el partido gubernamental, su falta de cohesión ideológica. La actuación parcial y corporativa del diputado Gómez Angulo, miembro del sector demócrata cristiano de la UCD, ingeniero de Minas y posterior director general de Minas quien, saltándose la disciplina de partido, presentó el 4 de mayo de 1978 una enmienda a la totalidad al proyecto de ley, enmienda que retiró, el 27 de octubre de 1978, al finalizar la primera sesión de la Comisión.

El contenido de su enmienda, bajo una capa de formalismo legal y perfeccionamiento administrativista, era demoledor, pues afectaba al contenido mismo de la constitución del Colegio. Criticaba su oportunidad, la adscripción ministerial, su redacción e, indirectamente, el título, pues cuestionaba quiénes eran geólogos:

En el título del proyecto y en el articulado del mismo se hablaba del Colegio Oficial de Licenciados y Doctores en Ciencias Geológicas, mientras que la Disposición adicional primera se refería al Colegio Oficial de Geólogos. ¿A quiénes íbamos a incluir en el Colegio? ¿A los Licenciados y Doctores en Ciencias Geológicas o a los Geólogos? ¿Son una misma cosa?

Para responder a este interrogante debo entrar en una de las dos cuestiones de fondo. ¿Qué es un Geólogo? ¿Los Licenciados en las Facultades de Ciencias Geológicas exclusivamente y los que desde esa Licenciatura se doctoran?¹.

O, más adelante, cuando haciendo una interpretación literal del texto, de forma totalmente interesada, establece si el término geólogo era inherente a otros profesionales:

Nos encontramos así con que no serían "geólogos" la casi totalidad de los actuales catedráticos de facultades de Ciencias Geológicas, ni una parte importante de los miembros de la Asociación de Geólogos Españoles (comprendiendo la Ponencia esta razón que me asistía, es por lo que ha introducido una Disposición transitoria); no lo serían tampoco los Ingenieros de diversas ramas especializadas en Geología; ni los Físicos especializados en Geofísica; ni los Químicos especializados en Geoquímica; ni los Matemáticos que cultiven la Geoestadística; y habría, en resumidas

| 1 Diario de Sesiones del Congreso de los Diputados, n.º 136, del 16 de noviembre de 1978, pp. 5433 y ss. (N.A.).

cuentas, como potenciales miembros del Colegio de Geólogos sólo aquellos que en 1978 terminaran sus estudios en la Facultad de Ciencias Geológicas creadas en 1973, más los escasos Doctores anteriores, procedentes de las Facultades de Ciencias².

Es perfectamente, admisible que los Licenciados y Doctores en Ciencias Geológicas deseen tener un Colegio que defienda sus intereses profesionales; pero no puede admitirse, en la actual ordenación universitaria, que sólo a ellos se les denomine Geólogos, pues antiguas especialidades, como los Licenciados de Ciencias Naturales, practican la Geología y ejercitan, con plenitud de derecho, su docencia, y Escuelas Técnicas de grados superior y medio, imparten esta especialidad³.

De la misma forma, condicionaba la obligatoriedad de la colegiación para ejercer la profesión:

No se puede, por otra parte, dejar abierta la posibilidad de que para ejercer la Geología haya que pertenecer a un Colegio Profesional concreto⁴.

Cuestionando también el título e, inclusive, su adscripción a un ministerio u otro. Para toda esta serie de planteamientos se apoya en repetidas referencias a la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS), al XXVI Congreso Internacional de Geología (París, 1980) y a una supuesta encuesta, a nivel mundial, sobre las especialidades universitarias o de escuelas de ingeniería que impartían la enseñanza de la geología y facultaban para ejercerla.

Por desgracia, y aunque a primera vista pudiera pensarse que al haberse retirado la enmienda sus efectos no afectarían al contenido del proyecto de ley, en el texto aprobado por la Ponencia y posteriormente sometido a votación en Comisión y aprobado unánimemente se observan los efectos del discurso del señor Gómez Angulo.

Tal es el caso cuando la Ponencia admite que la adscripción al Colegio de Geólogos no implica la atribución del ejercicio de la profesión:

[...] la Ponencia dice en su informe, textualmente, en el segundo párrafo: "La Ponencia, a propuesta del señor Gómez Angulo, consideró unánimemente

2 Diario de Sesiones del Congreso de los Diputados, *op. cit.* (N.A.).

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*

que la creación por ley del Colegio de Geólogos en ningún caso puede interpretarse como una atribución exclusiva del ejercicio de la profesión a sus colegiados”⁵.

o cuando se apoya en la Ponencia, para cuestionar el título del proyecto de ley:

En este amplio concepto actual de la Geología ¿se puede dejar fuera de un Colegio de Geólogos, si no se especifica que es de Licenciados y Doctores en Ciencias Geológicas, como ha hecho la Ponencia a aquellos Químicos, Físicos, Economistas, Ingenieros de Obras Públicas, Ingenieros de Minas e Ingenieros Agrónomos y Titulados medios que proceden muchas veces del trabajo, que de hecho y de derecho están capacitados para ejercer la Geología en alguna de esas áreas?⁶.

lo que queda manifiestamente claro al leer el Sumario del Diario de Sesiones del Congreso de los Diputados, n.º 136, del 16 de noviembre de 1978, donde se dice: “Proyecto de ley de creación del Colegio de Licenciados y Doctores en Ciencias Geológicas”.

Pero, merced al momento político que vivía el país, con un texto constitucional a punto de votarse en referéndum y el desconcierto que ello podía suponer en un parlamento neófito, o por circunstancias que al autor se le escapan (pero que supondrá una investigación específica futura), finalmente se consigue constituir el Colegio Oficial de Geólogos, mediante la Ley 73/1978, de 26 de diciembre; publicándose el 11 de enero de 1979 (BOE n.º 10), escasos días después de haberse aprobado la Constitución Española.

Los Estatutos definitivos se aprueban mediante Real Decreto 1709/1981, de 19 de junio, y en ellos se regulan: constitución y fines, funciones, organización, derechos y deberes de los colegiados, formas del ejercicio de la profesión, distinciones y sanciones, actividades científicas, culturales, sociales y asistenciales, etc.

Precisamente, su artículo 4, que desarrolla los fines de la Institución, rechaza frontalmente el acuerdo de la Ponencia respecto a la no atribución exclusiva al Colegio del ejercicio de la profesión, cuando dice:

Los fines esenciales del Colegio son la ordenación, en el ámbito de su competencia, de la actividad o ejercicio de la profesión de Geólogos; representación exclusiva y defensa de los intereses de la misma, sin perjuicio

5 *Ibid.*

6 *Ibid.*

de las competencias de la Administración y la libertad, a título individual de los colegiados para la afiliación o encuadramiento en organizaciones sindicales y/o patronales.

Tras el desarrollo autonómico del Estado se promulgó la Ley 7/1997, de 14 de abril, de medidas liberalizadoras en materia de suelo y de colegios profesionales, que ha obligado a todos los colegios a adaptar sus estatutos a la nueva legislación.

La Asamblea General Extraordinaria del ICOG, celebrada el día 27 de marzo de 1998, acordó modificar los Estatutos, en los términos expresados en la correspondiente propuesta, remitida al Gobierno para su aprobación, de conformidad con la Ley 2/1974 de Colegios Profesionales, de 13 de febrero; asimismo, ha acordado solicitar que el Colegio Oficial de Geólogos se relacione con la Administración General del Estado a través del Ministerio de Medio Ambiente.

Los nuevos Estatutos se aprobaron mediante Real Decreto 1378/2001, de 7 diciembre (BOE n.º 303, de 19 diciembre) y su artículo 13 define quién tiene la adscripción del ejercicio profesional:

Artículo 13

1. En concordancia con lo dispuesto en el artículo 3.2. de la Ley 2/1974, de 13 de febrero, Reguladora de los Colegios Profesionales, modificada por la Ley 7/1997, de 14 de abril, de Medidas Liberalizadoras en Materia de Colegios Profesionales (Boletín Oficial del Estado del 15 de abril), es requisito indispensable para el ejercicio de la profesión colegiada de geólogo, hallarse incorporado al Colegio y que el colegiado no esté sancionado por suspensión o expulsión temporal o definitiva del Colegio, de acuerdo con lo tipificado en el artículo 84 de estos Estatutos.

2. La profesión de geólogo es distinta de las titulaciones académicas quedando reservado su ejercicio a los miembros del Colegio.

Referencias bibliográficas

Anónimo (1954). Sucinta biografía del Profesor Eduardo Hernández-Pacheco. Boletín de la Real Sociedad Española Historia Natural (Geología), extraordinario: 7-34.

Ayala Carcedo, F. J. (1993). Bicentenario de Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859), eminente ingeniero de Minas-geólogo. Boletín. Geológico y Minero 104 (2): 211-219.

Baltuille Martín, J. M. (1999). El Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Crónica de dos décadas de andadura. *Tierra y Tecnología* 19: 61-62.

Barrera, J. L. (2000). El geólogo Eduardo Hernández-Pacheco y Esteban. Los primeros veintisiete años de su vida (1872-1898). V Congreso Geológico de España, Alicante, 10-14 julio, 2000. *Geotemas* 1(3): 45-49.

Barrera, J. L. (2002). Biografía de José Macpherson y Hermas (1839-1902). *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza* 45: 47-78. Madrid.

Dantín Cereceda, J. (1912). Noticia del descubrimiento de restos de mastodonte y de otros mamíferos en el Cerro del Cristo del Otero (Palencia). *Boletín de la Real Sociedad Española Historia Natural* 12: 78-84.

Ezquerro del Bayo, J. (1845). Sobre los antiguos diques de la cuenca terciaria del Duero. *Anales de Minas* 3: 317-350.

Hernández-Pacheco, E. (1912). Importancia del descubrimiento del Mastodon angustidens en el cerro del Cristo del Otero (Palencia). *Boletín de la Real Sociedad Española Historia Natural* 12: 68-69.

Hernández-Pacheco, E. (1913). Los vertebrados terrestres del Mioceno de la Península Ibérica. *Memoria de la Real Sociedad Española Historia Natural* 9: 443-488.

Limón Montero, A. (1979). Espejo cristalino de las aguas de España. IGME (1697). ed. facsímil. Francisco García Fernández (ed.), Alcalá de Henares.

López de Azcona, J. M. (1988). La tercera Dirección General de Minas (1928-1936). *Boletín Geológico y Minero* 99(2): 287-291.

López Vera, F. (1982). Alfonso Limón, pionero en el siglo XVII de una ciencia de hoy: la Hidrogeoquímica. *Boletín Geológico y Minero* 93(4): 346-352.

Martín Escorza, C. (1986). Vida, obra y cátedra del español José Macpherson. *El Geólogo* 20: 14-15.

Martín Escorza, C. (1987). Eduardo Hernández-Pacheco y Esteban. *El Geólogo* 21: 14-15.

Martín Escorza, C. (1994). El geólogo José Macpherson. *Tierra y Tecnología* 7: 66-70.

Ordóñez Delgado, S. (1994). El geólogo José Royo Gómez. *Tierra y Tecnología* 8: 63-65.

Rodríguez Mourelo, J. (1902). Don José Macpherson. Noticia necrológica. *Boletín de la Real Sociedad Española Historia Natural* 2: 312-356.

Sos Baynat, V. (1962). José Royo Gómez (1895-1961). *Boletín de la Real Sociedad Española Historia Natural (Geología)* 60: 151-175.

Truyols Santonja, J. (1993). La Geología española en la época de Juan Vilanova y Piera. Homenaje a Juan Vilanova y Piera, 1883-1993. *Geología, paleontología y prehistoria en el siglo XIX*. Universidad de Valencia, 213-228.

El geólogo y la hidrogeología

Marc Martínez Parra

Vocal de Hidrogeología del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG)

¿Qué es la hidrogeología?

La hidrogeología o hidrología subterránea es, según Mijailov, la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación. Es, por tanto, una de las ramas más complejas de la geología. Basta ver el índice del libro *Hidrología subterránea* de E. Custodio y M. R. Llamas, obra cumbre de la hidrogeología en castellano, publicado en 1975 y plenamente vigente en la actualidad, para confirmar su complejidad.

Históricamente la utilización del agua subterránea está ligada a la evolución de las sociedades en los albores de la humanidad, ya que se necesitaban dotes de observación e interpretación de la naturaleza para encontrar agua con la que sobrevivir. La combinación de necesidad de disponer de fácil acceso al agua subterránea y el ingenio humano le llevó a captar manantiales y desarrollar métodos de construcción de pozos y galerías. En Persia aparecieron los qanats —un tipo de galerías o minas de agua— en el 1000 a. C.; con la ruta de la Seda esta técnica llegó hasta China. Por otra parte, los celtas y los griegos utilizaban determinados manantiales como lugares sagrados pero fueron los romanos quienes desarrollaron las técnicas de captación de aguas y creación de infraestructuras (acueductos, embalses) que, a su vez mejoraron los árabes. Sin embargo, no es hasta 1836 cuando se establece la hidrogeología moderna

como ciencia, con la publicación por parte del francés Henry Darcy del libro *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* donde establecía la ley matemática —Ley de Darcy— que rige el flujo subterráneo y supone la piedra angular de esta ciencia.

Pero ¿qué es un hidrogeólogo? No existe una titulación universitaria como tal. Se estudia hidrogeología en algunas carreras universitarias como, entre otras, Ciencias Geológicas, Ingeniería de Minas o Ingeniería Forestal. Pero también hay muchos profesionales que, por experiencia en su trabajo, se autodenominan hidrogeólogos. Así podemos encontrar hidrogeólogos con las más diversas titulaciones medias y superiores: geólogos, ingenieros de minas, ingenieros forestales, ingenieros industriales, ingenieros geólogos, químicos, farmacéuticos, licenciados en Ciencias Ambientales, geógrafos, físicos, ingenieros técnicos de minas, de obras públicas o biólogos, entre otros. No es difícil comprender el motivo: cada una de las titulaciones estudia alguno de los aspectos científicos que conforman un todo que es la hidrogeología; así, los biólogos están más relacionados con el estudio del suelo y de la contaminación por microorganismos, los farmacéuticos con los análisis de agua y sus metodologías de determinación o los físicos con la aplicación de la geofísica a la hidrogeología. Así, un hidrogeólogo debe manejar conocimientos de geología estructural, estratigrafía, fotogeología, cartografía geológica, pero también de climatología, hidrografía, química analítica e isotópica, hidráulica, matemáticas avanzadas, métodos de perforación y de construcción, economía, legislación, etc. El hidrogeólogo es un auténtico hombre-orquesta de la geología.

También influye el conocimiento específico del medio litológico. La hidrogeología en rocas inconsolidadas, karstificadas o fracturadas se puede estudiar con metodologías específicas y herramientas desarrolladas para cada una de ellas.

Fórmulas que debe conocer todo hidrogeólogo

Ley de Darcy Ecuación de Bernouilli Ley de Ghyben-Herzberg Theis, Jacob, De Glee, Hantush, Thiem, Dupuit	Ley fundamental de la hidráulica. Sin ella la nada Para la comprensión del funcionamiento hidráulico O cómo estudiar la intrusión marina Métodos imprescindibles para la hidráulica de captaciones e interpretación de ensayos
Ecuación de Maillet Ecuación de Richards	La Piedra "Rosseta" del estudio de los manantiales Fundamental para el estudio de la ZNS
Ley de Fick Número de Reynolds	Utilizada para los estudios de hidroquímica Limita la validez de la Ley de Darcy

Principales fórmulas matemáticas que rigen el estudio y aplicación de la hidrogeología.

No obstante, obtener una titulación propia como experto en hidrogeología se consigue en la actualidad en el curso de especialización que imparte en Barcelona la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Curso Internacional de Hidrología subterránea, conocido coloquialmente como “el Custodio” en referencia a uno de sus principales profesores, y director durante décadas el eminente científico, doctor Emilio Custodio Gimena. Dicho curso, asociado con la Universitat Politècnica de Catalunya, lleva 43 ediciones y desde hace ocho años también se puede realizar on-line, en colaboración con diversos centros geográficos de apoyo, como, por ejemplo, la Universidad Complutense de Madrid.

Anteriormente existían otros cursos de especialización de gran tradición, como el Máster en Hidrología Subterránea impartido por el ITGE-ETSIIIM o el Curso de especialización en Hidrogeología “Noel Llopis”, impartido en la Universidad Complutense desde 1967 a 2001, y que alcanzó 35 ediciones y formó a 752 hidrogeólogos de diversas nacionalidades, quedando bruscamente interrumpido con la muerte de su director, su alma mater y motor del mismo, el doctor José Ramón Peláez.

Por último, mencionar que el ICOG en su titulación profesional recoge la posibilidad de obtener el título de Geólogo Profesional especialidad en Hidrogeología, con una experiencia probada de cinco años.

El trabajo que realiza

Heterogeneidad es la palabra que define el trabajo del hidrogeólogo. Se podría diagnosticar como alguien que sufre de trastorno de identidad disociativo o más corrientemente, personalidad múltiple. Las principales personalidades desarrolladas son las relacionadas con el medio ambiente, los estudios de carácter regional, la exploración, geotecnia, planificación, patrimonio o investigación, entre otras.

El hidrogeólogo encuentra su nicho laboral en la administración pública y en la empresa privada. En el primer caso el hidrogeólogo suele localizarse en la administración hidráulica —estatal o autonómica— así como en organismos autónomos como el IGME, aunque también en la universidad. En la empresa privada forma parte de la plantilla de grandes empresas consultoras, o bien puede trabajar en pequeñas consultoras o como profesional autónomo, atendiendo a la elaboración de informes y estudios locales.

El hidrogeólogo, el medio ambiente y la protección del recurso

El hidrogeólogo ambiental estudia las posibles afecciones a las aguas subterráneas por parte de la actividad antrópica. Evalúa los contaminantes de carácter puntual o difuso que pueden verse directa o indirectamente sobre el acuífero, de manera controlada

o incontrolada. Pero también contempla el impacto que pueden tener las diversas actividades antrópicas, como obras civiles, explotaciones mineras, etc.

Por ello la labor del hidrogeólogo pasa por realizar los estudios hidrogeológicos orientados a establecer si existe o no afección y la manera de corregir o mitigar sus efectos. Generalmente son trabajos solicitados por la Administración por lo que los clientes son empresas y particulares que los precisan para iniciar o continuar su actividad. Según el RD 606/2003 Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), en su artículo 257 la Autoridad Hidráulica exige un estudio hidrogeológico previo para evitar que sustancias peligrosas o acciones puedan afectar al acuífero, para autorizar su depósito o eliminar las sustancias peligrosas. Estos estudios deben estar suscritos por un técnico competente, el hidrogeólogo. A su vez, el Organismo de Cuenca podrá solicitar informe al Instituto Geológico y Minero de España. Así se tienen las dos caras de la moneda a nivel



Figura 1. Vertido de purines en Murcia (foto: M. Martínez).

laboral: el hidrogeólogo consultor, que trabaja para el sector privado y el hidrogeólogo de la Administración, que debe priorizar la protección de los acuíferos. Es posible que no exista siempre una sintonía entre ambos.

Se elaboran informes hidrogeológicos sobre los vertidos procedentes de instalaciones ganaderas, depuradoras, industrias de todo tipo (alimentarias, químicas, etc.), o vertederos, entre otros. Pero ¿qué debe contemplar uno de estos estudios? Según el artículo 258 del RD 606/2003, debe contener un mínimo de características hidrogeológicas de zonas afectadas, poder depurador del suelo y subsuelo, riesgo de contaminación y alteración de aguas subterráneas y si es una solución adecuada para el medio ambiente.

Pero en muchas ocasiones estos informes tratan de justificar, mediante una metodología más o menos adecuada, la inocuidad del vertido. No obstante, en la Administración es frecuente recibir informes incompletos que son rechazados con el consiguiente gasto para el particular por lo que es recomendable emplear a hidrogeólogos profesionales y experimentados que elaboren informes adecuados (figura 1).

La Directiva Europea Marco del Agua, elaborada por la Unión Europea en el año 2000 y su trasposición a la legislación española suponen un gran impulso laboral para los hidrogeólogos, ya que además de la necesidad de caracterización de las masas de agua subterránea y la protección de ecosistemas relacionados con las mismas, contempla la obligatoriedad de elaborar perímetros de protección para captaciones que suministran agua de origen subterráneo a más de 50 habitantes. Este último aspecto es importante en el Estado español ya que según el Libro Blanco del Agua Subterránea de 1995 la población que emplea agua subterránea para el abastecimiento se cifra en 12.000.000 de habitantes, aunque si consideramos los núcleos urbanos, un 70 por ciento de términos municipales inferiores a 20.000 habitantes se abastecen de agua subterránea.

El hidrogeólogo es el profesional más adecuado, si no el único, para llevarlo a cabo. Los perímetros de protección en cantidad y calidad de las aguas subterráneas son figuras no normalizadas que contemplan la protección y la restricción de actividades en una superficie en la que se moviliza el agua subterránea que se extrae por una captación. Se emplean criterios de delimitación hidrogeológicos y físicos (radio de influencia de la propia captación o tiempo de tránsito de un potencial contaminante hasta la captación). Para evitar restricciones innecesarias, los técnicos suelen zonificar los perímetros en zonas de restricción absoluta, máxima y moderada, variando en las mismas el tipo de actividad restringida. También se elaboran perímetros para captaciones de aguas minerales naturales y balnearios para proteger al recurso hídrico.

Otra actividad relacionada con el medio ambiente es la estimación de la vulnerabilidad de los acuíferos mediante la utilización de métodos hidrogeológicos, estadísticos, matemáticos o paramétricos, siendo éstos los más utilizados por su relativa sencillez. Con los métodos paramétricos se obtienen índices numéricos y se estiman tanto la vulnerabilidad asociada al acuífero —vulnerabilidad intrínseca— como la condicionada por el tipo de contaminante —vulnerabilidad específica—. Con estos índices se realizan mapas, recogiendo los intervalos en que la vulnerabilidad es muy baja, baja, moderada, alta o muy alta, con el fin de orientar al gestor de la ordenación del territorio.

También estos métodos paramétricos se han utilizado específicamente para evaluar el riesgo a la contaminación y la vulnerabilidad de los acuíferos de vertederos y grandes obras lineales, como oleoductos (Martínez et al., 1999). Asimismo, esta metodología se utiliza para evaluar la contaminación difusa, principalmente la intrusión marina y el contenido en nitratos. Es preciso conocer su extensión e incidencia para realizar una adecuada planificación.

Existen nuevos campos en los que el hidrogeólogo puede encontrar acomodo laboral: técnicas de descontaminación de acuíferos, de incremento de recursos hídricos, apoyo a las administraciones privadas (comunidades de usuarios) o el asesoramiento en el tema de las aguas minerales.

El hidrogeólogo y los estudios regionales

Los trabajos de hidrogeología más clásicos corresponden a estudios hidrogeológicos de carácter regional, con el fin de describir acuíferos o sistemas de acuíferos y conocer todas sus propiedades: dimensiones, parámetros hidráulicos, funcionamiento hidrodinámico, calidad de las aguas, usos, balance hídrico o disponibilidad del recurso, entre otros. Es básico, para la toma de decisiones, conocer el acuífero. Han sido fuente de trabajo para el hidrogeólogo consultor y de la Administración. Este tipo de estudios regionales tuvieron, durante las décadas de los setenta y ochenta del siglo pasado, un gran auge por parte del IGME, que con el Programa PIAS (Plan Investigación de las Aguas Subterráneas) estableció el conocimiento básico de los acuíferos, que en muchos casos no se ha mejorado. Posteriormente, se definieron por la DGOH-IGME las Unidades Hidrogeológicas (UU HH) con el fin de simplificar y ayudar al gestor en la administración de los acuíferos. Este grado de conocimiento de las UU HH ha sido evaluado por parte de técnicos del IGME, concededores de las mismas, estableciéndose una valoración de prioridades de 0-3 (ITGE-DGOH, 1999). En general, el desconocimiento parcial de ellas se encuentra entre un 57-100 por ciento del total de UU HH y precisan de estudios hidrogeológicos detallados. Sin embargo, y aunque se contemplaba en el Plan Hidrológico Nacional, no se ha impulsado suficientemente el estudio y actualización de los conocimientos hidrogeológicos.

La implantación de la DMA ha dado un nuevo impulso ya que es de obligado cumplimiento la caracterización básica de la nueva unidad físico-administrativa de gestión —la masa de agua— y en algunos casos la caracterización adicional, que será una suerte de nueva definición de los acuíferos poco conocidos.

Cuadro de grado de conocimiento-prioridades de la cuenca, en algunas cuencas (según IGME-DGOH, 1999)

CUENCAS HIDROGRÁFICAS	UH TOTALES	UH CON PRIORIDAD 2 Y 3	%
Norte	27	18	67
Duero	21	12	57
Tajo	13	13	100
Guadiana	13	13	100
Guadalquivir	73	52	71
Sur	50	27	54
Segura	37	24	65
Júcar	52	36	69
Ebro	61	34	56

El hidrogeólogo en la Administración

Como se ha descrito anteriormente, es preciso que todas las administraciones públicas, con competencia o no en materia de aguas, dispongan de técnicos cualificados en materia de aguas subterráneas que permitan establecer asesoramientos adecuados, valoraciones de los problemas así como una eficaz gestión hídrica. En la actualidad, en las confederaciones hidrográficas se incorporan hidrogeólogos a las plantillas, sin embargo, aún parecen estar por debajo de sus necesidades.

El número aproximado de funcionarios, para el año 2005, que realizaban labores de hidrogeología en la administración hidráulica peninsular y de las Illes Balears, era del orden de 30, aunque en las confederaciones tan sólo es de 15. Alarma que en algunas cuencas hidrográficas no hay hidrogeólogos o es ínfima su presencia en plantilla (Guadalquivir, Norte, Guadiana). Esta falta de técnicos especialistas en la plantilla fija se ha suplido habitualmente mediante contratos, empleando consultoras o a los técnicos del Instituto Geológico y Minero de España, que suma 51 profesionales, un 70 por ciento más del total de todas las administraciones juntas. Ello lleva a entender el papel que ha tenido el IGME en el desarrollo hidráulico en España, con planes infraestructurales como el Plan Nacional de Abastecimiento de Núcleos Urbanos (PANU), desarrollado desde 1975, que permitió abastecer a 1.766.769 habitantes o el Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), fundamental para la obtención de información hidrogeológica en España (López Geta, 2000). Sin embargo, el IGME ha pertenecido en los últimos 25 años a cinco ministerios distintos: de Industria y Energía, de Medio Ambiente, de Ciencia y Tecnología, de



Figura 2. Captación de abastecimiento en Carboneras de Guadazaón (Cuenca) (foto: M. Martínez).

Educación y Ciencia y en la actualidad al de Ciencia e Innovación. Este hecho, junto a la redefinición de sus funciones, con una reforma estatutaria en el año 2007 en la que se potencia su vocación investigadora y la disgregación de la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas, genera expectativas sobre cómo el IGME abordará su relación y asesoramiento a las diversas administraciones, y en especial a las hidráulicas (figura 2).

Otras administraciones, como las autonómicas, provinciales y locales, pueden disponer de hidrogeólogos según su política propia. Por ello se debe destacar a la Diputación de Alicante como pionera en la formación de equipos de hidrogeólogos, al disponer de un experimentado equipo en hidrogeología, ejemplo que, desgraciadamente, no ha tenido continuación en otras diputaciones provinciales.

El hidrogeólogo explorador. ¿Dónde hay agua?

La exploración es otra de las labores clásicas de los hidrogeólogos. El objeto es buscar agua en suficiente cantidad y calidad para satisfacer adecuadamente una demanda y para ello se deben encontrar las mejores localizaciones con el fin de extraer agua para diferentes usos: abastecimiento, riego o industria. Para ello el hidrogeólogo debe emplear todas sus dotes de observación en un minucioso trabajo de campo y el conocimiento de interpretación de las estructuras geológicas existentes.

Es básico conocer la zona de estudio. Para ello se realiza un trabajo de gabinete —recopilación bibliográfica, fotogeología, climatología— y un trabajo de campo —inventario de puntos de agua, descripción geológica, muestreo, medidas de caudal, de nivel piezométrico, usos del agua y focos de contaminación—. Se puede plantear una campaña de geofísica, sin embargo, su coste desanima al particular en su uso. Un estudio de estas características no es un simple acopio de información, es imprescindible que sea detallado y muy

descriptivo de la parte del acuífero del entorno estudiado. Se deben identificar y describir los principales acuíferos, sus parámetros hidráulicos, el quimismo de sus aguas, su funcionamiento hidrodinámico. Pero la geología no es el único criterio a considerar a la hora de elaborar el informe; se debe contemplar la calidad de las aguas para el uso que pretenda dársele y la proximidad de las instalaciones existentes —energía eléctrica, canalizaciones, depósito— así como la facilidad de acceso a las mismas.

Índice estándar del contenido de un estudio hidrogeológico de abastecimiento

1. Introducción
 2. (Antecedentes)
 3. Abastecimiento actual
 4. (Estudio climático)
 5. Características geológicas
 - Estratigrafía*
 - Tectónica*
 6. Características hidrogeológicas
 - Inventario de puntos de agua*
 - Formaciones geológicas susceptibles de constituir acuíferos*
 7. Focos de contaminación
 8. Alternativas de captación de aguas
 9. Características de las propuestas para la mejora del abastecimiento
 10. Bibliografía
- Anexos: mapa de situación, mapa geológico, mapa hidrogeológico.

Una vez decidido el emplazamiento del sondeo de investigación, debe ejecutarse dicho sondeo con el concurso de empresas perforadoras profesionales con solvencia, garantía de un trabajo correcto. El hidrogeólogo debe describir la litología y demás características —fracturas, recristalizaciones, oquedades—; a ello se le denomina levantar la columna litológica. Existen diversos tipos de muestras, en función de la metodología de perforación, desde la extra-



Figura 3. Muestras cada dos metros de un sondeo perforado mediante rotopercusión con martillo en fondo (foto: M. Martínez).

ída mediante la obtención de testigo continuo a la del análisis del ripio de la rotopercusión o la circulación. Una vez determinadas las formaciones acuíferas de interés, diseña el equipamiento del sondeo —tipo de entubación, enrejillado, prefiltro— y realiza o supervisa el ensayo de bombeo para su interpretación y poder determinar el caudal de explotación recomendable. Son prácticas

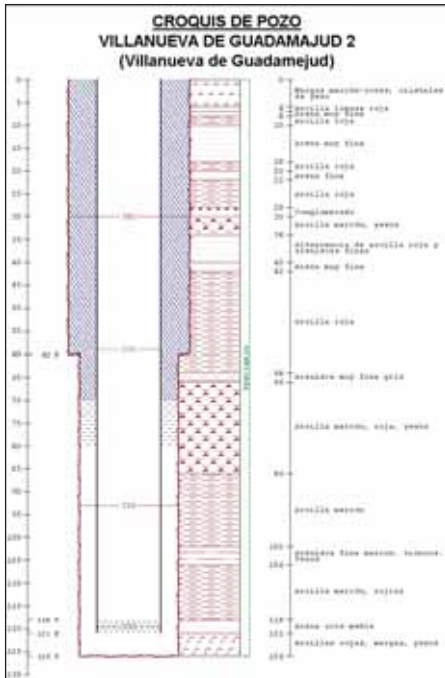


Figura 4. Perfil constructivo y litológico de un sondeo (foto: M. Martínez).

Figura 5. Perforación mediante rotoperación con salida de muestra y agua del acuífero (foto: M. Martínez).

Figura 6. Ensayo de bombeo de un sondeo perforado (foto: M. Martínez).

habituales los ensayos escalonados con el fin de desarrollar el sondeo además de determinar el caudal (figuras 3-6).

Los estudios con el fin de obtener agua pueden llevar a la perforación de sondeos que permiten el desarrollo de zonas deprimidas. Así en España, durante la década de los años sesenta del siglo pasado el Proyecto Guadalquivir permitió el abastecimiento y

desarrollo del sur de España, mediante los sondeos para planes de riego que efectuó el Instituto de la Colonización.

También las ONG desarrollan estas labores en los países del Tercer Mundo. Geólogos del Mundo ha desarrollado dicha labor en Centroamérica y Malí. Otro ejemplo de la utilización de las aguas subterráneas para el abastecimiento y desarrollo de la sociedad es el proyecto "Great Man-Made River", desarrollado en Libia desde 1981, que destina a riego y abastecimiento de las principales ciudades el agua extraída (6,5 hm³/día) mediante sondeos de más de 500 m de profundidad que explotan un acuífero fósil en medio del desierto (Wikipedia, 2006) (figuras 7 y 8).



Figura 7. Vista desde el cielo de los riegos en el desierto de Libia (foto: Wikipedia)

Figura 8. Muestreo de zona no saturada en las lagunas de Villafáfila (foto: L. Moreno).

El hidrogeólogo investigador

La investigación en hidrogeología abarca todo lo que le ocurre a la gota de agua en el ciclo hidrológico, desde su estancia en la nube hasta su salida por un manantial o hacia el mar, caracterizándose en todos sus aspectos los medios por los que circula (suelo, zona no saturada, acuífero). Así se pueden encontrar investigaciones sobre el comportamiento de las aguas subterráneas en acuíferos carbonáticos y/o karstificados, la presencia de arsénico en las aguas subterráneas, a partir de la situación de crisis sanitaria creada en Bangladesh, el estudio del comportamiento de posible agua subterránea en otros planetas como Marte, o el funcionamiento hidrodinámico de las aguas subterráneas presentes en grandes masas de hielo como en la Antártida o la utilización del quimismo de las aguas para la predicción de movimientos sísmicos. Aunque evidentemente existen muchas líneas de investigación, según Voss (2005) se contemplan como tendencias principales actuales las siguientes:

- ▶ Desarrollo de herramientas informáticas para problemas precisos. Problema inverso, modelos estocásticos.
- ▶ Nuevas técnicas geofísicas. Desarrollo de la teledetección en hidrogeología.
- ▶ Tecnología de recuperación y descontaminación de acuíferos.
- ▶ Influencia del cambio climático e impactos a medio y largo plazo.
- ▶ Desarrollo de nuevos métodos paramétricos para estimación de recarga y vulnerabilidad específica e intrínseca.
- ▶ Nuevos modelos hidrogeológicos de funcionamiento hidrodinámico en rocas fracturadas y kársticas.
- ▶ Hidrogeología profunda.
- ▶ Estudio de la ZNS.
- ▶ Sistemas de información geográfica aplicados en hidrogeología.

La investigación hidrogeológica en España tiene sus luces pero también sus sombras. La realización de investigaciones y tesis doctorales acarrearán una importante necesidad de soporte económico, así, aparte del consabido gasto que supone el desplazamiento a la zona de estudio y el reconocimiento hidrogeológico en campo, que se supele con el esfuerzo y dedicación de los investigadores, se deben añadir gastos no habituales en otras especialidades geológicas; un ejemplo de ello son los análisis físico-químicos de aguas subterráneas, de costes superiores a 100 euros/unidad, y analíticas de isótopos que se realizan en España en contados laboratorios. También es preciso contar para la medición de diferentes parámetros hidráulicos o realización de diversos ensayos, de un variado equipo de campo (sondas piezométricas, conductividad, molinetes, sensores de registro continuo, etc.) o incluso necesitar la realización de campañas geofísicas, la perforación de sondeos de reconocimiento o la testificación continua de los mismos. Si el estudio precisa de la utilización de programas informáticos, las licencias de éstos, debido a su exclusividad, suelen ser prohibitivos, aunque existen versiones académicas. Todo ello lleva a que para una persona que no pertenezca a una universidad o escuela técnica, no disponga de una beca de investigación o no participe en un proyecto de investigación, le resulte un objetivo inalcanzable la realización de una tesis doctoral.

Existen numerosos equipos de investigación, modestos unos, otros no, asociados a diferentes departamentos de universidades y escuelas técnicas. Asimismo, algunos equipos o escuderías de investigadores, especializados en distintos aspectos de la hidrogeología, gozan de mayor renombre y lideran la investigación en España. Sin embargo, lo que en un principio parece adecuado, podría condicionar las líneas de investigación a nivel nacional, si quedasen relegadas a un segundo plano tanto otras líneas de trabajo como otros equipos de investigadores. Una costumbre extendida en el mundo de la investigación es la de acceder a trabajos, desde los propios centros educativos o por parte del

personal investigador a ellos adscritos, que por su naturaleza corresponderían a empresas consultoras y a profesionales hidrogeólogos.

Otro aspecto a considerar en el sistema educativo español es la falta de reconocimiento a las largas trayectorias y experiencia de los profesionales en hidrogeología mediante los denominados doctorados profesionales, cada vez más corrientes en el mundo universitario anglosajón.

El hidrogeólogo en la planificación

Uno de los trabajos principales es el del estudio de los acuíferos, UU HH o, según la DMA, masas de agua. Para facilitar la gestión de los acuíferos, la DGOH y el IGME definieron, en la década de los noventa del siglo pasado, las Unidades Hidrogeológicas como unidad físico-administrativa de gestión; recientemente con la implantación de la DMA se está estableciendo un nuevo catálogo de áreas acuíferas a proteger: son las masas de agua, relacionadas principalmente con el uso de los acuíferos para abastecimiento humano y/o relacionados con ecosistemas. Según los plazos estipulados por la trasposición de la DMA es preciso un estudio básico de las masas de agua y una ampliación adicional en las que se considere de interés. Ello puede suponer una fuente de trabajo para los hidrogeólogos españoles, ya que un estudio hidrogeológico pasa por la recopilación de la información existente y la generación de nueva. Sin embargo, cada vez más se tienden a elaborar refritos de información ya existente y no se actualiza, lo que puede limitar las posibilidades de futuro de este trabajo.

Otro aspecto de la planificación es la incorporación de las aguas subterráneas mediante el uso conjunto. La combinación de las aguas superficiales y subterráneas en periodos húmedos o extremadamente secos precisa de un conocimiento amplio de la hidrogeología por parte del gestor, que a su vez se puede apoyar en modelos matemáticos de simulación. La utilización de aguas superficiales en épocas húmedas, utilizando el excedente para recargar acuíferos que se emplearán en épocas de sequía es práctica habitual en los Estados Unidos pero en España tiene un escaso arraigo, a causa de una concepción "superficialista" del agua en la Administración. Sin embargo, esta metodología se empieza a implantar en el Canal de Isabel II, con un equipo propio de hidrogeólogos.

También existe el desarrollo de nuevas metodologías para incrementar los recursos hídricos, como los métodos de recarga artificial o desalación de aguas salobres de acuíferos con agua de mala calidad para uso humano. También para evitar los efectos de la intrusión marina o de contaminantes se han desarrollado metodologías de barreras físicas, químicas

o de inyección para detener el avance del contaminante, como se aplicó, con escaso éxito, en relación con el desastre de Aznalcóllar.

El impacto de las sequías puede mitigarse con una adecuada planificación que incorpore a las aguas subterráneas. La planificación ante situaciones de sequía es obligación de las diversas administraciones hidráulicas, y de los gestores —públicos o privados— encargados del abastecimiento de más de 20.000 habitantes. No obstante, las administraciones locales, provinciales y autonómicas, podrían tener un papel más activo para afrontar estas crisis climáticas mediante la elaboración de sus propios planes de sequía por parte de profesionales hidrogeólogos.

La participación del hidrogeólogo en la elaboración o modificación de leyes, como la reciente propuesta de modificación del TRLA por parte del Grupo de Trabajo de Aguas Subterráneas (UAM-GTAS, 2006) o la redacción de la Directiva Hija es fundamental para la consecución de los objetivos que se pretenden.

Otros campos de trabajo

La hidrogeología se aplica en geotecnia para conocer si existen acuíferos y cómo pueden afectar a las obras y construcciones. Se realizan estudios en las obras de construcción en el subsuelo para evitar posibles inundaciones de bajos, sótanos y parkings, como ocurre con relativa frecuencia, relacionado con los ascensos del nivel piezométrico de los acuíferos cuaternarios sobre los que se asientan ciudades como Barcelona y Murcia, o a causa de drenajes inapropiados. Gran importancia también tienen en relación con la ejecución de la construcción de obras lineales como túneles, ferrocarriles, vías de circulación (autopistas, autovías, etc.) así como otras infraestructuras como embalses y presas.

El Convenio Internacional suscrito en Ramsar (Irán), en 1971, relativo a la protección, conservación y uso racional de los humedales de importancia internacional conlleva la necesidad de un mayor conocimiento de los mismos y a él se encuentran adheridos 123 Estados, entre ellos España. Su aplicación y la creación de espacios naturales protegidos conducirían a precisar la incorporación de hidrogeólogos, para el estudio de los humedales relacionados con las aguas subterráneas, así como su evolución y posibles afecciones. En el año 2006 hay catalogados 46 de estos humedales (http://aguas.igme.es/zonas_humedas/ramsar/home.htm), con muy diferente nivel de protección (figura 9).

El de las aguas comercializadas como aguas embotelladas es otro de los campos de interés. Aparte de un estudio hidrogeológico específico, con un especial énfasis en la evolución hidroquímica, es preciso conocer adecuadamente el acuífero para elaborar un perímetro de protección adecuado. Pero también un hidrogeólogo avezado en este



Figura 9. Lagunas de Arcas de Villar-Ballesteros. Cuenca (foto: M. Martínez).

tema puede asesorar al particular en todos los trámites de carácter legal que puede precisar, así como establecer controles y seguimientos para, a partir de la evolución de parámetros físico-químicos, niveles piezométricos o de caudales, poder determinar si están sufriendo algún tipo de afección indeseable.

Patrimonio hidrogeológico incorpora al concepto de patrimonio geológico los elementos renovables como las aguas subterráneas y sus manifestaciones externas singulares. Los puntos catalogados dentro del patrimonio hidrogeológico presentan características que los hacen únicos, ya sea por su rareza, por su historia o por representar las características químicas o hidráulicas de una formación acuífera (Martínez y Moreno, 2004). Su fragilidad ante las actividades antrópicas puede llevar a un rápido deterioro y a la pérdida irremediable de este legado; por ello, para su conservación es imprescindible la catalogación y definición de medidas de protección. Martínez y Moreno (2004) propusieron como criterios de clasificación el interés hidrogeológico, la existencia de algún tipo de declaración de uso, el interés histórico-artístico y uso tradicional y el termalismo.

Otros temas son la relación de la hidrogeología y el petróleo, el almacenamiento profundo de CO_2 y de residuos radiactivos con el desarrollo de metodologías para el estudio de medios con baja permeabilidad.

También el estudio de la influencia del cambio climático en las aguas subterráneas (disminución del recurso, de la calidad de las aguas, etc.) es un campo que se abre hacia la necesidad de emplear al profesional hidrogeólogo.

El hidrogeólogo en la sociedad

La visión que tiene la sociedad del hidrogeólogo viene mediatizada por el ninguneo que los medios de comunicación ejercen, especialmente los audiovisuales, favoreciendo en los mismos a la imagen del zahorí, constituyendo un flagrante ejemplo de intrusismo profesional y de engaño al ciudadano. Sería interesante preguntar a cualquiera de estos periodistas que promocionan a estos personajes y no a la labor callada de los hidrogeólogos, si se sienten a gusto con sus plazas de trabajo ocupadas por misses, hijos de famosos, concursantes de realities y demás caterva de personajes que pululan por las televisiones.

El zahorí es un ser presuntamente dotado de poderes paranormales, una especie de mutante miembro de los X-Men, viva imagen de la España Negra, capaz, con o sin ayuda de aparatos, mediante sacudidas y convulsiones, de localizar agua y como el Papa, disfrutar del don de la infalibilidad, puesto que, según su testimonio, nunca falla. Además, como Paco Lobatón, te busca algún familiar desaparecido o dónde has dejado las llaves del coche. Charlatanes que aprovechan la necesidad de la gente, algunos creen ciertamente que poseen poderes, pero otros obtienen con ello un sobresueldo o supone su profesión, libre de impuestos, y que aprovecha el desconocimiento y el apuro de particulares. Incluso algunos disponen de equipos de perforación o van asociados a sondistas. No obstante, deben asumirse los propios errores, ya que el hidrogeólogo y su jerga científica están alejados del pueblo llano y, generalmente, los estudios hidrogeológicos son más caros que la pantomima de la varilla.

EL HIDROGEÓLOGO Y EL SÍNDROME DEL SELECCIONADOR DE FÚTBOL

El hidrogeólogo se enfrenta, en más ocasiones de las deseadas al "síndrome del seleccionador de fútbol". Este síndrome, muy español, consiste en que cualquier persona, independientemente de su formación, sabe más del tema de trabajo que el técnico. Ello tiene su reflejo en los continuos entorpecimientos por parte de los profanos, emitiendo juicios de valor, generalmente sin fundamento científico, sobre la valía del trabajo del hidrogeólogo. Gran parte de este prejuicio es fomentado por la presencia del personaje siniestro del zahorí.

LA FÁBULA DEL ZAHORÍ Y EL ARTISTA

Existen muchas anécdotas sobre zahoríes, aunque ellos, evidentemente, no las relatan. A mis oídos me llegó una que por su final resulta muy ilustrativa. Un conocido cantante castellano-manchego tenía una gran finca sin agua para beber y regar. Tenía dos opciones, traérsela del pueblo, situado a varios

kilómetros de distancia, o perforar un sondeo. Eligió la segunda y para ello contó con el asesoramiento de un zahorí de fama provincial. Este visitó la finca, y tras un paseo por la misma, llegó a su linde y dijo:

—Aquí hay mucha agua.

—Bien —dijo el artista—, pero hay un problema, donde ha marcado el punto se encuentra fuera de mi finca. ¿No se puede perforar unos metros más hacia aquí, dentro de mis tierras?

—No —dijo el zahorí— el agua está aquí.

Así que el artista indagó de quién eran los terrenos aledaños. El dueño de los mismos, que vivía en el extranjero, vio una oportunidad inmejorable de negocio y le vendió no una parte de su finca, sino toda su extensión, que no era poca.

Procedió a perforar el sondeo y el artista no tuvo suerte. Ni gota de agua. Así que tuvo que traerse el agua del pueblo, pagando una cara canalización.

Moraleja: Mientras el zahorí presume de encontrar agua para un artista de renombre, la falta de asistencia técnica de un hidrogeólogo le costó al artista comprar una finca que no necesitaba, perforar un sondeo inútil y pagar una costosa obra de canalización desde la población.

Herramientas que utiliza

Existen numerosas herramientas empleadas en hidrogeología, siendo muchas de ellas muy específicas para la obtención de datos. El hidrogeólogo desarrolla su trabajo en todos los medios por los que el agua circula: el atmosférico, la superficie, el suelo, la zona no saturada y el propio acuífero. Por ello, no es objeto de este apartado una enumeración de todas las herramientas, sino las más básicas y que se emplean con mayor habitualidad dentro de los estudios hidrogeológicos.

El inventario de puntos de agua consiste en un exhaustivo trabajo de recopilación en campo de los datos de una captación: situación, profundidad, columna litológica, medida del nivel piezométrico, caudal de bombeo, muestreo químico, determinaciones en campo... Un profesional lo hace con rigor, charlando con el particular y aprovechando todo aquello que él recuerda: qué material salía al perforar el sondeo... El profesional debe traducir términos locales como greda (marga), rodano (conglomerado compacto), piedra (caliza)... Sin embargo, cada vez más se ha ido al trabajo fácil, con poco trabajo real de campo y mucho de solicitar bases de datos al IGME, con lo que no se actualizan datos (figuras 10 y 11).

También se evalúa la vulnerabilidad de los acuíferos mediante técnicas indirectas. En ello predominan los métodos paramétricos, empleándose índices que recogen los diferentes aspectos de los acuíferos. Existen muchos y diversos, aunque los que se emplean



Figura 10. Hidrogeólogo muestreando una fuente (foto: L. Moreno)

Figura 11. Aforando un manantial de gran caudal en Cuenca (foto: M. Martínez).

comúnmente son los denominados DRASTIC y GOD, acrónimos de los parámetros que contemplan. Así DRASTIC corresponde a Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact of vadose zone, Cydraulic conductivity mientras que en GOD la G corresponde a tipo de acuífero, O a la litología que hay por encima del mismo y D la profundidad del nivel piezométrico. Aunque parece una metodología objetiva, es el hidrogeólogo quien selecciona los valores que se dan, por lo que es preciso que sea un hidrogeólogo con experiencia quien elabore y emplee los índices.

El estudio de la hidroquímica permite una mejor comprensión del funcionamiento de los acuíferos y de los procesos e influencias que sufre el agua que circula por los mismos. En la hidroquímica influyen tanto el propio medio litológico, en la zona saturada y no saturada, como las influencias antrópicas que son origen de procesos contaminantes. Las técnicas de estudio más empleadas son las diversas representaciones gráficas —las más habituales son los diagramas triangulares denominados de Piper-Hill-Langelier—, el estudio de relaciones entre iones o relaciones iónicas, su representación en mapas, o el empleo de modelos matemáticos de transporte de solutos.

Para el estudio y determinación de niveles piezométricos el hidrogeólogo puede realizar un exhaustivo inventario y campañas periódicas de medidas de nivel piezométrico. La administración hidráulica también dispone de piezómetros construidos ex profeso para el control de los acuíferos. Son las denominadas redes de monitoreo o control. El conocimiento de qué equipos puede disponer el hidrogeólogo para efectuar su labor es fundamental: existen equipos de registro continuo de piezometría, conductividad, temperatura, de diversos iones, turbidez, pH; también hay muestreadores automáticos de agua, molinetes de agua para determinar caudales, etc.

Los modelos matemáticos representan conceptualmente un sistema geológico, empleándose tanto para apoyo a la gestión hídrica, en definición de perímetros de protección o para la investigación. Se utilizan para determinar incógnitas en cuanto a piezometría, concentraciones químicas o temperatura. Se suele partir de una adecuada definición del sistema y posteriormente se calibra con series de datos reales, probando hasta que el modelo permita explicar dichas series. Los más empleados corresponden a los modelos matemáticos numéricos que utilizan como técnicas de resolución los elementos finitos o las diferencias finitas. Se puede modelizar el funcionamiento hidrodinámico de un acuífero, obteniendo, por un lado, los parámetros que más se adecúan a las series históricas de datos empleadas y luego se pueden hacer diversas hipótesis de funcionamiento ante distintas situaciones como explotaciones intensas, sequías, etc. Igual pasa con los modelos de transporte, pudiendo simular la evolución de contaminantes a partir de un foco puntual o difuso, permitiendo los modelos de densidad variable, simular el comportamiento de la intrusión marina. Sin embargo, el punto débil de la modelización son los datos de partida y, específicamente, la obtención de los parámetros hidráulicos necesarios y que se ajusten a la realidad. Por ello es preciso que el hidrogeólogo modelista conozca físicamente el área estudiada o bien esté en contacto con el hidrogeólogo que ha obtenido y aportado los datos.

La monitorización de los acuíferos es fundamental para el conocimiento específico de los mismos, equipando puntos de agua que pueden pertenecer o no a redes de control, tanto de investigación como de la administración hidráulica. La comodidad y las prestaciones de estos equipos permiten obtener niveles piezométricos, caudales y características fisico-químicas de las aguas de una manera continuada y ser almacenados y transmitidos hasta el PC del despacho (figuras 12 y 13).



Figura 12. Equipamiento de surgencia para determinar de manera continuada la conductividad (foto: M. Martínez).

Figura 13. Descarga de datos de oscilación piezométrica en piezómetro equipado a tal efecto. Obsérvese la tapa antivandálica de protección (foto: M. Martínez).





Figura 14. Ensayo de permeabilidad (foto L. Moreno).

El conocimiento de la hidrología isotópica permite, mediante el empleo de trazadores naturales y/o artificiales, determinar características hidráulicas (permeabilidad, dirección de flujo, tiempo de tránsito) pero también la existencia de filtraciones en presas y vertederos, el funcionamiento de los flujos en los sondeos o la datación de las aguas y el establecimiento de diversas familias, así como su utilización en la testificación geofísica de sondeos, permiten equipar adecuadamente las captaciones (figura 14).

Los trabajos en cartografía hidrogeológica facilitan una herramienta al gestor de recursos hídricos. El mapa hidrogeológico contiene fundamentalmente información geológica e hidrológica, ocupándose no sólo de fenómenos que acaecen sobre la superficie del terreno, sino también de aquellos que tienen lugar en el subsuelo.

Existen diversas clasificaciones de estos mapas atendiendo a diversos criterios como la escala, los objetivos o el contenido. Según la escala se diferencian mapas a pequeña escala ($<1:500.000$), útiles para planificación; mapas a escala media ($1:500.000$ a $1:100.000$), documentos de síntesis hidrogeológica y mapas a gran escala ($>1:100.000$), el resultado de investigaciones específicas. Atendiendo a los objetivos se diferencian mapas generales y con fines especiales, que incluyen elementos hidrológicos individuales (concentración de un determinado ión, el uso del agua, etc.). Por último, según el contenido, los mapas pueden ser de movimiento del agua, de caracteres físico-químicos del agua y de posibilidades de explotación.

Originados en Estados Unidos y Gran Bretaña, los Sistemas de Información Geográfica-SIG permiten tener la información geográfica digitalizada y georreferenciada, relacionada con bases de datos externas que pueden contener toda la información referente a cada uno de los aspectos que interesen, independientemente de la fuente originaria de los datos. Funciona como capas temáticas que se pueden superponer y generar información nueva. Una de las ventajas del soporte informático es su relativa sencillez para mantenerla actualizada. Y la otra es la integración de los datos. También permite realizar mapas "a la carta" con fechas actualizadas: mapas de inventario, de piezometría, valores hidroquímicos, etc.

También influye el conocimiento del medio litológico. La hidrogeología en rocas consolidadas, karstificadas, detríticas, inconsolidadas, fracturadas, volcánicas o carbonatadas, aunque comparte una metodología básica, ha desarrollado para cada una de ellas herramientas específicas. Así, para el estudio de acuíferos kársticos se estudian las evoluciones de los caudales y su relación con otros parámetros, como la pluviometría, la hidroquímica; utilizándose los isótopos para estudiar la hidrodinámica del sistema kárstico.

La geofísica aplicada a la hidrogeología contempla dos aspectos distintos: la exploración de los acuíferos sobre el terreno, con sus límites físicos o bien la testificación geofísica empleada tanto para conocer parámetros físicos (permeabilidad), calidad química de las aguas o comportamientos hidrodinámicos como para realizar una instalación adecuada de sondeos (situación correcta de filtros y rejillas).

Por último, mencionar el estudio de las aguas minerales y termales, un campo de gran potencial al haberse incrementado el consumo de agua embotellada en este país; así como el desarrollo de la geotermia, con el fin de encontrar fuentes de energía alternativas y naturales.

¿Con qué profesionales se relaciona?

Como se ha descrito en apartados anteriores, la definición de hidrogeólogo no lleva pareja una titulación universitaria única, sino que muchos profesionales hidrogeólogos comparten trabajo con otros de distinta titulación, también hidrogeólogos, como geólogos, biólogos, ingenieros, químicos, farmacéuticos, ingenieros técnicos y un largo etcétera.

Condicionado por el tipo de trabajo que se realiza, el hidrogeólogo puede relacionarse con profesionales ajenos a la hidrogeología: así, para estudios de impacto ambiental puede relacionarse con ingenieros de caminos, técnicos de obras públicas o licenciados en derecho; igualmente puede ocurrir con trabajos relacionados con contaminación de las aguas, vertidos y estudios regionales. Ello se acentúa más si el estudio es demandado por la Administración. Sin embargo, si el trabajo es sobre patrimonio hidrogeológico, se puede trabajar con arqueólogos e historiadores.

¿Quiénes son sus principales clientes?

La amplia oferta de campos relacionados con las aguas subterráneas que estudian los hidrogeólogos permite tener entre sus clientes a un amplio espectro de la sociedad, desde la administración local, autonómica y estatal para estudios exploratorios locales, estudios de planificación regional, de contaminación de acuíferos, de caracterización de masas de agua o desarrollo de herramientas informáticas, por citar algunos. Pero también

se realizan trabajos de consultoría para empresas privadas —industrias, granjas, agricultores— y particulares; así se puede elaborar un estudio de afección a las aguas subterráneas por parte de un complejo industrial o marcar un sondeo de abastecimiento a una casa de campo o a un chalé de una urbanización.

Referencias bibliográficas

Custodio, E. y Llamas, R. M. (1975). Hidrología Subterránea. Omega, Barcelona.

ITGE-DGOH (1999). Programa de actualización del inventario hidrogeológico (PAIH), Madrid.

López Geta, J. A. (2000). Contribuciones del Instituto al conocimiento y protección de las aguas subterráneas en España. Custodio, E.; Huerga, A. (eds.). Ciento cincuenta años (1849-1999). Estudio e investigación en Ciencias de la Tierra. IGME, Madrid.

Martínez, M.; Delgado, P. y Fabregat, V. (1999). Aplicación del método DRASTIC para la valoración de la vulnerabilidad de acuíferos frente al riesgo potencial de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. ITGE-AIH, Madrid.

Martínez, M.; Moreno, L. (2004). Propuesta de catálogo de puntos singulares del Patrimonio Hidrogeológico de la Región de Murcia. Geotemas 6(4): 123-126.

Universidad Autónoma de Madrid-Grupo de Trabajo de las Aguas subterráneas (2006). La gestión de las aguas subterráneas. Propuesta desde la participación. CD.

Voss, C. (ed.) (2005). The future of hydrogeology. Hydrogeology Journal 13(1).

Wikipedia (2006): Great Man-Made River.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Great_Manmade_River).

El geólogo en la exploración y explotación minera

Manuel Regueiro

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Roberto Oyarzun

Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas.

Universidad Complutense de Madrid

La importancia de la actividad minera y de la geología de minas

El hombre ha sido minero y geólogo desde los albores de la humanidad. Primero a través de las industrias líticas; fragmentos de rocas o minerales más o menos trabajados para su uso como herramientas o armas; luego continuó con los metales, extrayéndolos desde los minerales (edades del Cobre, Bronce, Hierro), refinándolos y combinándolos en aleaciones a medida que progresaba, de paso, inventando



Figura 1. Operación de carga de mineral oxidado de cobre en la mina Radomiro Tomic (RT) en el distrito minero de Chuquicamata (Chile).

la metalurgia. Ésta es una historia de búsqueda de recursos, de su minería y de las aplicaciones tecnológicas de los productos obtenidos. Se puede decir, por lo tanto, que la minería es la industria más antigua y la de minero y geólogo “la segunda profesión más antigua” (figura 1).

La humanidad progresó vertiginosamente durante el siglo XX, generando falsas ilusiones sobre lo que parecía un futuro muy alejado de sus balbuceantes comienzos industriales hacia finales del siglo XVIII y comienzos del XIX. Pero, ¿cuál es la realidad presente? Lo cierto es que la sociedad sigue siendo absolutamente dependiente de los recursos minerales, con ejemplos tan clásicos como los metales hierro, cobre, cinc, o menos tradicionales pero cada vez más relevantes, como las rocas y minerales industriales. Hoy, la industria minera extrae anualmente alrededor de 40.000 millones de toneladas brutas de materiales, para producir 29.000 millones de toneladas brutas de más de 100 minerales y rocas distintos comercializables. Por otra parte, la incorporación de las llamadas economías emergentes (China, Brasil, India, etc.) no ha hecho más que incrementar de manera notable la demanda de recursos minerales.

Esas sustancias, para que tengan interés para la industria, deben poder producirse de manera legal y rentable y, especialmente hoy en día, de un modo respetuoso con el medio ambiente. Es decir, los depósitos minerales son elementos geológicos que pueden investigarse científicamente por sí mismos o como parte de un ecosistema local y como elementos económicos que deben evaluarse en lo que respecta a las autorizaciones pertinentes y su rentabilidad.

El advenimiento de las nuevas tecnologías (p.ej., microelectrónica) es complementario y no alternativo en la mayoría de los casos. Baste con poner de ejemplo los materiales requeridos para la construcción de un edificio o una carretera (arena, grava, áridos, cemento, acero, cinc, cobre, etc.), aviones o coches (una larga lista de metales comunes o especializados, materiales cerámicos), el tendido eléctrico (acero para las torres, cobre en el cableado). Analicemos por un momento el ordenador que uno tiene al frente: componentes de cobre, piezas de aluminio, un cable de cobre para enchufarlo al tendido eléctrico, o el mismo chip procesador (silicon chips). Por último, si nos remitimos a las tecnologías avanzadas, no olvidemos que el sistema ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) funciona a través del mismo hilo de cobre que porta la señal telefónica (figura 2).

Si se medita todo esto un momento, se llegará a la conclusión que detrás de casi cada aspecto de la vida moderna está esa actividad oculta, a veces no bien entendida, que es la minería. Al respecto hay una frase muy ilustrativa que aparece en una pegatina de la

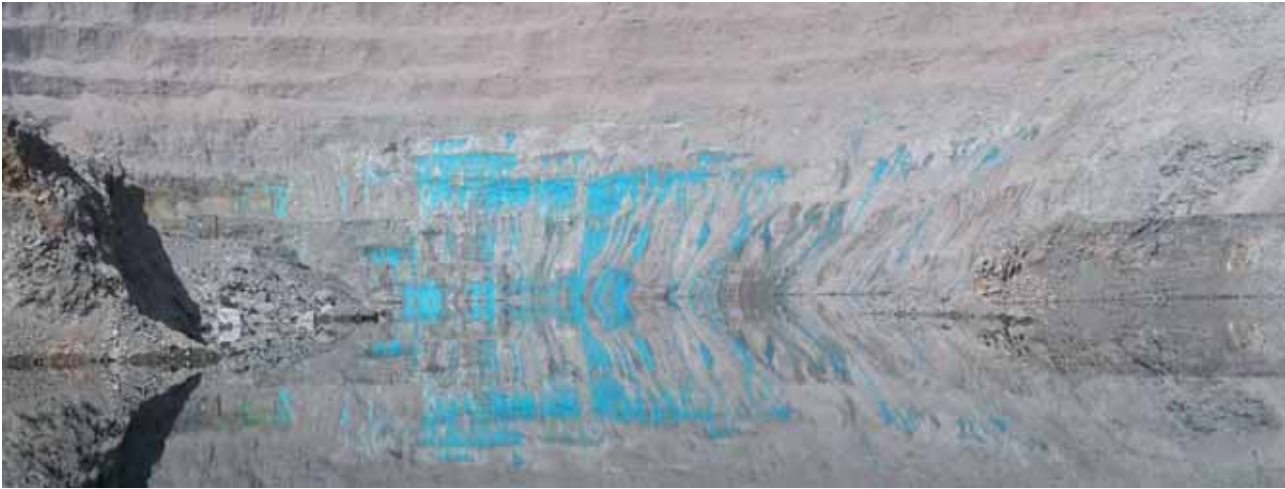


Figura 2. Oxidados de cobre precipitados en la corta de Mina Sur (distrito minero de Chuquicamata) reflejados sobre una charca.

Nevada Mining Association: If it isn't grown it has to be mined (si no se cultiva, habrá que extraerlo de una mina). En este sentido, si bien es comprensible un cierto nivel de ignorancia sobre estas materias por una parte importante de la sociedad, no lo es tanto en lo que se refiere a los gobernantes, ya que, si ha habido una actividad perseguida por leyes progresivamente más severas, esta es la minería. Si lo que se ha pretendido es proteger el medio ambiente en España o Europa en general, el resultado final de estas medidas es la exportación del problema a terceros países. Y si bien no se quiere tener la actividad minera en casa, la demanda de productos mineros en los países de la Unión Europea no cesa. ¿Genuina preocupación ambiental o hipocresía?

Existe otro aspecto de la minería que la caracteriza y diferencia de las demás industrias: los yacimientos minerales están donde están y no pueden cambiarse de ubicación, como una fábrica de cualquier otro producto. En otras palabras, los recursos minerales poseen un valor "localizado". Hay que asumir por eso que como la localización de los yacimientos los dicta la naturaleza, no dependen del hombre que necesita esos minerales para su supervivencia. De esta manera, hay que tener muy claras las prioridades a la hora de decidir sobre si un determinado yacimiento se pone o no en explotación por cuestiones sociales o ambientales. En otras palabras, este tipo de decisiones pueden comprometer el futuro de la propia sociedad que se pretende defender.

En resumen, la industria minera es esencial para el desarrollo de la sociedad moderna y, además, ofrece retos muy interesantes para carreras geológicas en temas como explotación y exploración de rocas y minerales metálicos y no metálicos de uso industrial.

El papel del geólogo en la industria minera

El geólogo en las minas

El papel del geólogo en una mina cambió significativamente durante el siglo XX. En los primeros tiempos, la labor geológica en una mina (si es que se realizaba alguna) era llevada a cabo por un ingeniero de minas, con mayores o menores conocimientos sobre el tema. En este sentido parece pertinente relatar una historia muy ilustrativa del pensamiento antiguo y sobre cómo las cosas empezaron a cambiar. En la década de los años veinte, el contenido en oro del yacimiento de Homestake (Estados Unidos) decrecía y pareció que se iba a agotar el rico filón. Dos ingenieros de la plantilla encargados de analizar el futuro de la mina observaron que a niveles por debajo de los 375 metros las dimensiones de los filones disminuían rápidamente, concluyendo que éstos terminarían en roca estéril a los 600 metros; en otras palabras, Homestake se agotaba. El presidente de la compañía, Edward Clark, no daba crédito a los informes pesimistas, aunque era evidente que la producción estaba disminuyendo. Contrariamente a las costumbres de la época tomó la decisión de pedir un segundo informe a otro experto, un geólogo de minas perteneciente a una institución académica (en aquellos años, dos herejías al mismo tiempo). El geólogo elegido era Donald D. McLaughlin, profesor de la Universidad de Harvard quien, antes de dedicarse a la enseñanza, había consagrado varios años a trazar mapas de las zonas ricas en cobre de Los Andes peruanos. McLaughlin pasó el verano de 1926 estudiando la roca que afloraba en las laderas y el interior de Homestake. Lo que vio le llevó a una conclusión diametralmente opuesta a las pesimistas predicciones anteriores: lejos de agotarse, el filón era rico y extenso. Lo que había engañado a los ingenieros de Homestake era la peculiar forma del filón. McLaughlin determinó que el filón había sido originalmente una masa ininterrumpida, que posteriormente había sido atravesada por diques estériles, que encerraban bolsas de mineral. Desde el principio los mineros habían volado y transportado a superficie la roca estéril junto con la masa filoniana aurífera, procedimiento largo y costoso. El excelente mapa que McLaughlin dibujó de la geología de la mina, permitía predecir el curso del filón por las zonas aún no explotadas. Trazó luego los planos de las nuevas galerías, de manera que siguieran el filón, evitando las zonas de roca estéril. A muchos empleados de Homestake les hizo poca gracia que un geólogo de Harvard les viniera a decir que estaban haciendo mal su trabajo, y a McLaughlin le resultó difícil convencerles. Pero cuando se adoptó el plan de explotación selectiva, el valor de cada tonelada subió a más del doble. Fue así, en gran medida, que los métodos de la geología de minas, tal como los sentó McLaughlin en Homestake, se fueron haciendo imprescindibles en las minas de todo el mundo.

Esta historia real nos lleva a una segunda reflexión, la geología es antes que nada mapas. Lo segundo más importante son los mapas y, por último, siempre están los mapas. Sin mapas no hay geología, es la base que sustenta todo el entramado en nuestra profesión. Poco o nada importan los supuestos méritos curriculares de un aspirante a geólogo de minas o exploración si entre éstos no se encuentran las habilidades y destrezas necesarias para hacer un mapa geológico (figura 3).

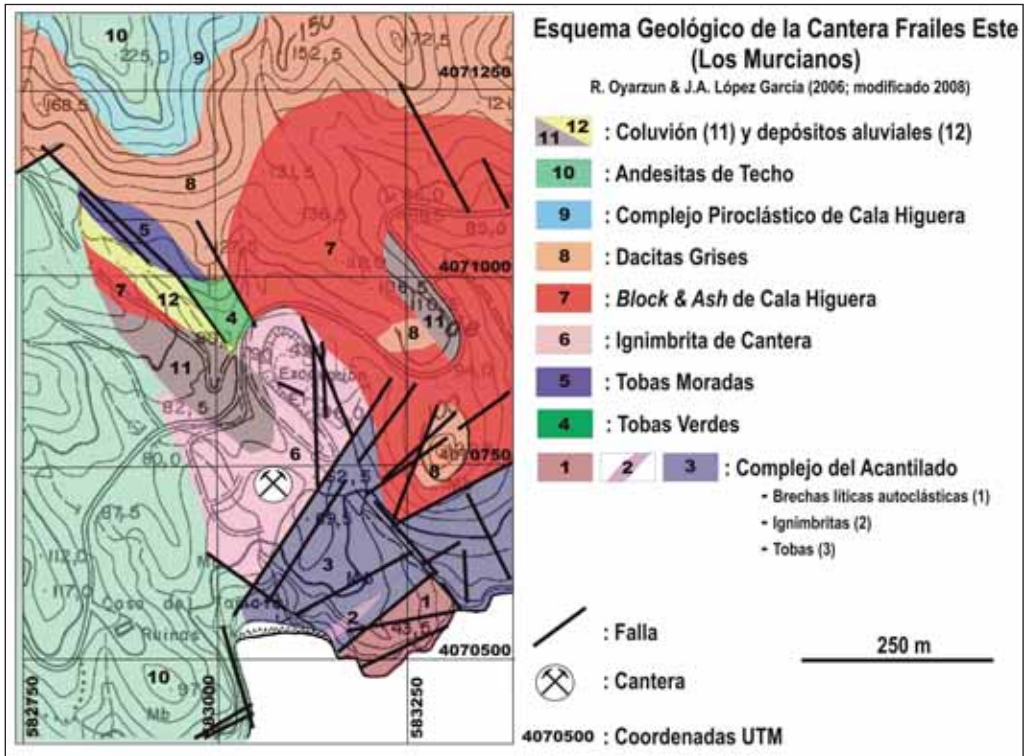


Figura 3. Ejemplo de mapa geológico realizado para un estudio geomínero en Almería.

Hoy en día, cualquier compañía minera medianamente importante dispone de un departamento de geología, sección también conocida en otros países como superintendencia de geología. Un departamento de geología puede tener hasta más de 10 geólogos, y en distritos mineros importantes, como el Chuquicamata en Chile, la cifra puede alcanzar a los 70 geólogos. Éstos cumplirán distintas tareas en la mina: cartografía, testificación de sondeos, estimación de reservas, planificación a corto, medio y largo plazo de la explotación minera, estudios geotécnicos, estudios mineralógico-texturales. A estas labores habría que sumarles las de exploración en el entorno inmediato de la explotación minera o en áreas alejadas (figura 4).



Figura 4. El ámbito de trabajo en las minas.

El departamento de geología deberá tener un diálogo fluido y permanente con algunos departamentos de ingeniería (explotación, metalurgia). Esto es vital, ya que el ingeniero debe conocer de la manera más precisa posible el sector de la mina que se va a explotar, empezando por las características geotécnicas de la roca. En lo que se refiere a la parte metalúrgica, la labor del geólogo es doble. Por una parte, debe indicar de manera exacta las leyes del mineral que entrará en la planta de tratamiento y, por otra, las características mineralógicas y texturales de la mena y la ganga. Lo normal en un yacimiento mineral es que la abundancia relativa de los minerales varíe, lo cual puede tener repercusiones enormes. Supongamos a manera de ejemplo que la ley de cobre en una mina no varía substancialmente en profundidad, pero que la mena principal pase de calcopirita a enargita. Este último mineral contiene arsénico, lo cual significa que habrá repercusiones técnicas y ambientales; en otras palabras, habrá que adaptar los procedimientos metalúrgicos. Por otra parte, el tipo y grado de molienda tendrá que adaptarse a las variaciones del grado de liberación de la mena. O qué decir de las explotaciones auríferas que operan con el método de lixiviación en pila. El que la mena de oro sea rica o no en sulfuros tiene grandes implicaciones ya que el principal reactivo empleado (cianuro: CN^-) tiende prioritariamente a formar compuestos con el azufre (tiocianato) (figura 5).

En lo que respecta a la exploración minera, reseñaremos aquí algunos casos interesantes, donde la labor geológica jugó un papel decisivo.



Figura 5. Cianuración en pila en la mina El Solado, Chile.

Donde dije digo, digo Diego: la importancia de ser adaptable. O cómo 'wrong' también puede convertirse en 'right' (Olympic Dam, Australia)

En los años cincuenta se desarrolló una auténtica revolución en el pensamiento geológico en Australia con respecto al origen de los yacimientos metalíferos del Precámbrico. Hasta entonces, estos yacimientos habían sido considerados como hidrotermales s.s., esto es, generados por soluciones calientes ascendentes provenientes de un magma granítico. Pero de pronto, empezaron a aparecer rasgos geológicos que apuntaban a que estas mineralizaciones podían ser de origen sedimentario, por ejemplo, el caso de Broken Hill. Analicemos por un instante las consecuencias de este cambio radical del pensamiento. Estos yacimientos podían ser explicados en términos sedimentarios, sin que hiciera falta la intervención de cuerpos ígneos profundos. Este pensamiento se vio reforzado por los estudios que habían realizado los geólogos ingleses (principalmente) en el Copper Belt de Zambia (en esa época: Rodesia del Norte). De acuerdo con las ideas prevaletentes, esos yacimientos de cobre (p. ej., Mufulira, Rokana, N'kola, etc.) se habían generado por procesos sedimentarios, en los que habían intervenido probablemente también, procesos bacterianos, electroquímicos y exhalativos. Sumemos a esto que se suponía (y supone), que el cobre se había derivado del basamento de

la secuencia proterozoica que alberga las mineralizaciones estratiformes del Copper Belt. De esta manera, con sentido común, los geólogos australianos hicieron un rápido ejercicio mental percatándose de que en principio también ellos disponían de un basamento antiguo y una cubierta proterozoica-cámbrica, de tal manera, que ¿por qué no podía haber en Australia yacimientos de cobre equivalentes a los del Zambian Copper Belt? En Australia del Sur estaban las rocas muy antiguas del cratón Gawler y, encima de éstas, en discordancia, las facies sedimentarias del Stuart Shelf. Reforzando aun más este pensamiento estaba la presencia de un pequeño yacimiento estratiforme de cobre emplazado en las facies del Stuart Shelf: Mount Gunson. Utilizando datos indirectos, tales como intersecciones de lineamientos gravimétricos y magnéticos de carácter regional-continental, los geólogos de la compañía minera Western Mining decidieron que el punto donde hoy está Olympic Dam era el más promisorio. Este modelo de exploración (teórico en muchos aspectos) se veía reforzado por el hecho de que el yacimiento de Mount Gunson estaba precisamente asociado a uno de esos lineamientos. Los sondeos comenzaron en 1975, cortando el primero de ellos sedimentos horizontales del Cámbrico y el Proterozoico (facies del Stuart Shelf). Luego, el sondeo pasó la discordancia (con el cratón Gawler) y cortó 40 metros de mineralización de cobre de baja ley (~ 1 por ciento Cu), y no fue hasta el noveno sondeo que se encontraron leyes económicas. Los geólogos de la Western Mining rápidamente se dieron cuenta de que había dos cosas que no encajaban con el modelo: la zona mineralizada estaba en el basamento, no por encima de éste, y la roca encajante de la mineralización eran cuerpos de diatremas hematíticas, no sedimentos. Digamos que los hechos modificaron radicalmente la perspectiva dictada por el modelo de exploración. A continuación, a medida que se estudiaba en mayor detalle la geología del yacimiento, se continuó refinando el modelo. Los hechos pueden ser resumidos de la siguiente manera:

1. Modelo de exploración (pre-sondeos): yacimiento estratiforme de cobre en la cubierta sedimentaria de un basamento antiguo.
2. Debris flow de brechas y avalanchas de roca a lo largo de los escarpes de fallas activas. Las brechas habrían sido mineralizadas por las soluciones provenientes de actividad geotermal en relación con un vulcanismo.
3. El modelo avanzado: yacimiento principalmente hidrotermal formado hace unos 1.600 Ma, asociado a diatremas que se formaron en relación con un vulcanismo ácido.

A partir de esta historia extraiga sus propias conclusiones, sin olvidar que la exploración necesita de mentes con ideas lo suficientemente flexibles, sin embargo, como para que un modelo (que puede ser correcto o no) jamás atenace nuestras decisiones. La cratonización es un fenómeno que debe afectar a las rocas, no al pensamiento.

El descubrimiento de Kalamazoo (o cómo San Manuel recuperó su otra mitad)

Pocos ejemplos ilustran mejor la importancia de los estudios geológicos estructurales como el descubrimiento del yacimiento tipo pórfido cuprífero de Kalamazoo en la década de los sesenta, en el cual participó de manera fundamental el geólogo americano J. D. Lowell. Dicho descubrimiento está rodeado de varios aspectos notables entre los que habría que destacar, sobre todo, el estudio integral del problema. Si no entendemos la geología de una zona, poco podremos hacer en lo que respecta a exploración, salvo que se confíe en la suerte como elemento esencial del proceso. Esto cobra especial relevancia si lo que se está buscando es un cuerpo que puede no aflorar.

Los años setenta estuvieron marcados en el campo de la geología económica por la publicación de una serie de trabajos sobre alteración hidrotermal (pórfidos cupríferos) en la revista americana *Economic Geology*. Quizá el más significativo de ellos es un clásico en el tema: *Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits* (Lowell y Guilbert, 1970). Una de las ilustraciones más conocidas del trabajo muestra la zonación espacial de las facies de alteración hidrotermal en San Manuel-Kalamazoo (Arizona, EE UU). En la actualidad, dicha figura se encuentra en prácticamente todos los textos de estudio sobre yacimientos minerales. Sin embargo, un detalle a veces poco señalado (y en ocasiones omitido) en dicha figura es la presencia de una falla que corta el esquema de manera oblicua. Se trata de la falla San Manuel y, como veremos a continuación, bajo el punto de la aplicación de métodos estructurales al estudio y exploración de yacimientos minerales, es un rasgo extremadamente importante, paradójicamente, poco o nada señalado en los textos de estudio. San Manuel-Kalamazoo no es ni económica ni geoméricamente un yacimiento único; por el contrario, se trata de dos cuerpos mineralizados basculados: San Manuel y Kalamazoo, notablemente separados en el espacio por una falla normal de bajo ángulo (falla San Manuel). Si bien originalmente constituían un solo cuerpo mineralizado, el movimiento normal de la falla cortó el cuerpo mineralizado generando los dos segmentos actualmente conocidos. San Manuel (más cercano a la superficie) se localiza a muro de la falla y Kalamazoo 1,6 kilómetros hacia el Oeste (a una profundidad de 800-1.220 metros) a techo. Lo importante: si bien San Manuel era conocido, el descubrimiento de Kalamazoo (Lower K) fue la consecuencia de un trabajo geológico integrador, que relacionó las facies de alteración y la mineralización con la estructura. El razonamiento básico de exploración fue el siguiente (Lowell, 1968):

1. San Manuel representaba sólo una parte de un cuerpo mayor.
2. El cuerpo se encontraba basculado.

3. La falla que cortaba San Manuel era normal y de bajo ángulo. Conclusión, un segmento de San Manuel tenía que estar más abajo, sobre la falla.
4. Resultado: efectivamente, más abajo, hacia el oeste yacía un cuerpo mineralizado, luego bautizado como Kalamazoo (Lower K).

El trabajo del geólogo en la minería actual

Vamos a intentar dar respuesta a la serie de preguntas que se podría hacer cualquier geólogo o estudiante de geología que desee especializarse en este campo.

¿Qué es un geólogo que trabaja en la industria minera?

Es una persona que tiene como trabajo cotidiano la búsqueda, investigación y explotación de yacimientos minerales cuya explotabilidad sea económicamente rentable. El doctor Ridge decía ya en 1983 que las únicas razones por las que las compañías mineras contratan a geólogos son: encontrar yacimientos explotables con rentabilidad, o asegurarse de que la totalidad del depósito que está siendo minado es extraído, asimismo, en condiciones de rentabilidad (figura 6).

Actualmente, hay dos grandes campos de la industria minera que determinan también dos tipos distintos de geólogos especialistas:

- ▶ Minería metálica.
- ▶ Minería de rocas y minerales industriales.

Dentro de esos dos grandes campos, hay geólogos que trabajan en exploración minera exclusivamente y geólogos que trabajan directamente en la explotación de los recursos minerales en minas o canteras, en los estudios ambientales previos a la explotación, en el seguimiento ambiental de los trabajos de restauración simultáneos con la explotación y en los proyectos de restauración ambiental tras el término de las mismas. Los geólogos de exploración especialistas en minería metálica son los responsables de la localización de nuevos yacimientos o de investigar los conocidos. Para localizar un yacimiento, los geólogos utilizan técnicas tales como sensores remotos (imágenes de satélite), fotogeología, cartografía geológica, petrología, geofísica (estudios con equipos magnéticos, radiométricos, eléctricos, sísmicos o gravimétricos) y geoquímica. La fase inicial conlleva una larga y ardua labor de campo, muchas veces en sitios remotos del planeta, donde la recompensa proviene de tres fuentes diferentes aunque complementarias:

1. La posibilidad real de encontrar un cuerpo mineralizado.
2. Un salario excepcionalmente bueno.



Figura 6. Geólogos en Mina Sur (Chile).

3. El recorrer lugares remotos que la inmensa mayoría de la gente sólo sueña con ver.

Por otra parte, planifican y ejecutan campañas de muestreos superficiales y de sondeos con extracción de testigo continuo sobre cuyos testigos se realizarán los correspondientes ensayos de laboratorio. Toda la información obtenida deberá analizarse para elaborar los correspondientes informes de valoración preliminar, incluida una valoración económica previa. Una vez localizado el yacimiento o yacimientos, se planifican, en función de los conocimientos geológicos adquiridos previamente, nuevas campañas de sondeos o muestreos para definir el tamaño y calidad del cuerpo mineralizado para determinar, a fin de cuentas, si el yacimiento es o no explotable económicamente (figura 7).

Los geólogos de exploración especialistas en rocas y minerales industriales deben estar familiarizados con las características geológicas de los yacimientos de más de 50 rocas y minerales diferentes pertenecientes a todos los ambientes geológicos y geoestructurales conocidos. Estos productos mineros son utilizados simultáneamente en un importante número de industrias por sus propiedades físicas y químicas y no por la energía o elementos químicos que se puedan extraer de ellos. Deben conocer también las especificaciones de esos materiales para su empleo en las distintas industrias que, normalmente, son distintas para idénticas materias primas.

Los geólogos que trabajan en minas y/o canteras a cielo abierto se dedican a labores cotidianas de gestionar los departamentos geológicos de las empresas mineras, cuyo trabajo es establecer las propiedades geológicas y estructurales del yacimiento,

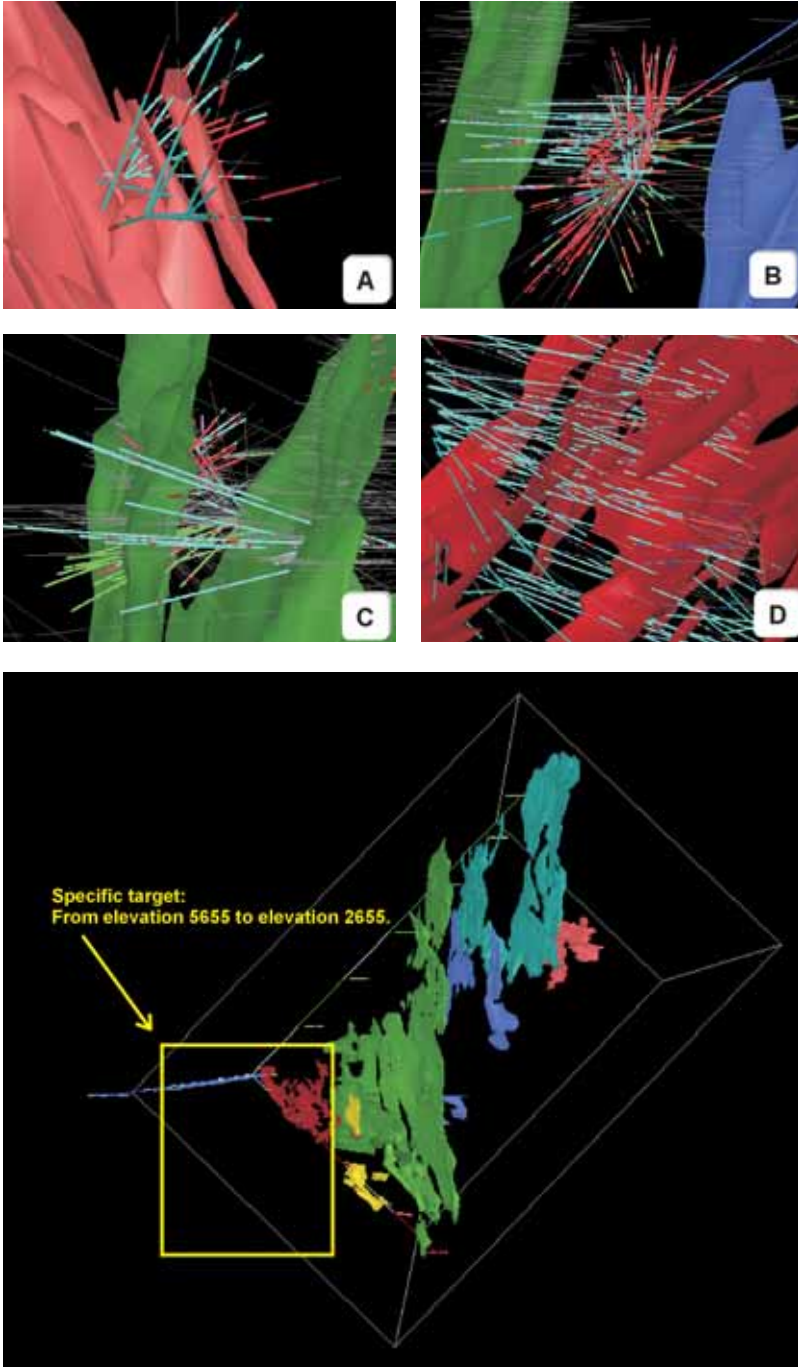


Figura 7. Modelización 3D geológica, mina Red Lake, Canadá. Arriba, cuerpos mineralizados y sondeos. Abajo, blanco profundo de exploración aurífera.

realizando mapas de gran detalle tanto superficiales como, en su caso, del interior de la propia mina, al mismo tiempo que se testifican y analizan los sondeos, ya a la escala minera, que se van realizando con el avance de la explotación (figura 8).



Figura 8. Izquierda: la moderna testificación de sondeos con ordenadores Tablet de campo (Mina Sur; Chuquicamata, Chile). A la derecha: geólogo estudiando un plano de falla en la mina Rosita (La Serena, Chile).

¿Qué importancia tiene el trabajo del geólogo en las explotaciones mineras?

Como ya se ha dicho, la mayoría de los objetos que caracterizan el Estado del bienestar están hechos de minerales y, sin ellos, no sería posible la vida moderna, tal y como la conocemos ahora. También se han puesto ejemplos de casos en que la explotación minera sin la intervención del geólogo hubiera cerrado. Por lo tanto, debido a que en la minería moderna el geólogo primero descubre el yacimiento y, más tarde, aporta el conocimiento sobre sus características intrínsecas, su trabajo es fundamental en las explotaciones mineras (figura 9).



Figura 9. Geólogos en el Salar de Atacama, en las cercanías de las explotaciones de sales de litio.

¿Qué debe saber el geólogo que trabaja en minería?

Es evidente que un geólogo que trabaje en exploración minera debe tener un conocimiento adecuado en la geología de los yacimientos que busca. Pero, sobre todo, debe tener un sólido conocimiento de las técnicas cartográficas y la geología estructural. Además debe estar familiarizado con las características por las cuales un yacimiento puede ser reconocido como explotable. El profesional que trabaja en la geología económico-minera se ve abocado de manera casi rutinaria a realizar estimaciones sobre el potencial de cualquier tipo de yacimiento, lo que le obligará con frecuencia a clasificar en términos "económicos" las masas minerales.

J. D. Lowell, uno de los geólogos de exploración más exitosos del mundo, resume las características que debe tener un geólogo de exploración minera en los siguientes términos:

- ▶ Debe ser una persona inteligente, con una buena experiencia y formación académica.
- ▶ Tiene que ser capaz de pensar de manera "crítica" y, si es necesario, rechazar lo que piensan otros colegas suyos.
- ▶ Debe ser, como señalábamos, una persona con sólidos conocimientos geológicos, pero al mismo tiempo, no ser un pedante atenazado por el miedo a equivocarse, ya que su negocio consistirá en "equivocarse la mayor parte del tiempo".

Cuando habla de sólidos conocimientos geológicos, Lowell quiere decir que un geólogo de exploración debe ser capaz de manejar diversas técnicas (por ejemplo):

- ▶ Deberá ser capaz de producir buenos mapas geológicos, a veces en condiciones rudimentarias de trabajo.
- ▶ Para ello deberá tener unos sólidos conocimientos de geología estructural, petrografía, etc. Esto no significa que tenga que ser un "especialista" en estas técnicas.
- ▶ Importante: deberá ser capaz de crear hipótesis de trabajo.
- ▶ Deberá tener conocimientos de economía, especialmente si trabaja en un nivel senior.
- ▶ Deberá ser capaz de entender de transacciones de propiedades, el estatus de los terrenos, negociar transacciones, etc.
- ▶ Deberá ser un poco "masoquista", con deseos de subir montañas y vivir en sitios desagradables (pocas veces la exploración toma lugar cerca de ciudades o de la "civilización").
- ▶ Deberá tener una familia que comprenda su trabajo.
- ▶ Pero, sobre todas las cosas, deberá tener un compromiso absoluto con la idea de descubrir nuevas mineralizaciones.

Con el tiempo y la práctica de asumir algún tipo de riesgo al manifestar opiniones, se acaba por poner a punto una sofisticada técnica de estimación, cuya teoría acaba asimismo dominándose a fuerza de abrir los ojos, los oídos y sobre todo la mente, a métodos de trabajo y lenguajes propios de equipos multidisciplinares.

A continuación se incluyen algunas de las tareas que desarrolla un geólogo especializado en minería:

- ▶ Cartografía geológica, testificación de sondeos, elaboración de bases de datos e interpretación geológica.
- ▶ Elaboración y supervisión de contratos de campañas de sondeos.

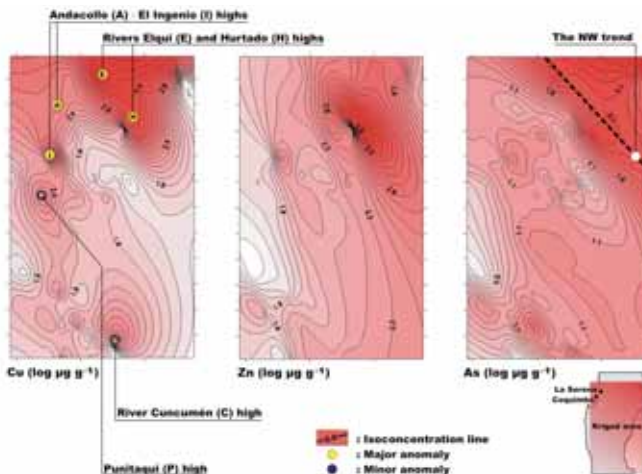
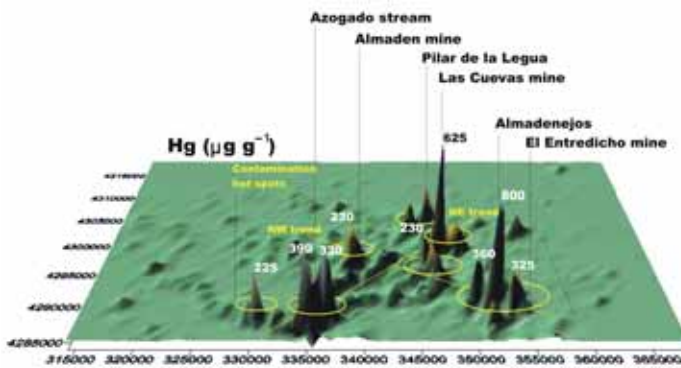


Figura 10. Dos ejemplos de modelización de la dispersión de metales pesados en sedimentos fluviales mediante *kriging*. Arriba, cuencas hidrográficas en el norte de Chile; abajo, el distrito de Almadén.

- ▶ Gestión de programas de exploración.
- ▶ Estimación de reservas y recursos. Empleo de programas de ordenador.
- ▶ Auditoría de estimaciones de reservas y recursos.
- ▶ Evaluación y valoración de propiedades mineras.
- ▶ Geología estructural y exploración geológica.
- ▶ Estudios de evaluación del impacto ambiental.
- ▶ Proyectos de restauración del espacio afectado por las explotaciones mineras (figura 10).

¿Cuántos geólogos trabajan en el campo de la minería?

El empleo en minería metálica y de rocas y minerales industriales en España ha venido descendiendo paulatinamente en los últimos años según las cifras proporcionadas por el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. En el año 1992, trabajaban en este campo un 25,5 por ciento del colectivo colegiado en activo. Sin embargo, ya en el año 2002, trabajaban en minería un 17,9 por ciento y habían elegido especializarse en este campo en sus estudios universitarios un 3,41 por ciento. En el año 2008, trabajan en el campo de la minería metálica y de las rocas y minerales industriales sólo un 2 por ciento de los colegiados. Por lo que se refiere a la especialidad de licenciatura, se han especializado en este campo un 6,81 por ciento.

¿Qué puestos de trabajo desempeñan los geólogos en este campo?

Se puede decir que prácticamente todos, desde geólogos junior hasta directores de los departamentos de Geología e incluso directores de las empresas. Aquí hay una diferencia entre España y los países anglosajones e iberoamericanos, países estos últimos donde los geólogos están mucho más valorados y son corresponsables de las grandes decisiones empresariales.

¿Qué deficiencias de formación se detectan a la hora de enfrentarse al trabajo?

Fundamentalmente falta de adaptación de los planes de estudio al mercado de trabajo. Ya hemos comentado genéricamente antes qué conocimientos se necesitan para trabajar en este campo pues, sobre todo, las técnicas específicas generalmente no se conocen, con lo que en el postgrado, o más bien en la empresa, hay que aprenderlas, lo que supone un esfuerzo de formación adicional, coste económico para la empresa y de tiempo para los técnicos.

En ese sentido un geólogo especialista en minería debería tener la siguiente formación:

Bachillerato

Durante el bachillerato, el futuro estudiante de Geología, además de estudiar las asignaturas de ciencias, matemáticas e informática debe disponer de habilidades en relaciones humanas y oratoria y, si es posible, incluir en su formación algo de ciencias ambientales y microeconomía. Los futuros geocientíficos deben desarrollar unas especiales habilidades de observación y tener mucha curiosidad ya que su futuro trabajo geológico o en el laboratorio requerirá desarrollar especialmente esas facetas.

Otro aspecto del bachillerato que no debe descuidarse es el de los idiomas. El ámbito de la minería mundial es infinitamente más grande y diverso que el nacional, y las oportunidades de empleo se multiplican en gran medida si se sabe inglés y francés. En especial, las multinacionales del sector que trabajan en todo el mundo fundamentan su proceso de selección en la titulación académica y la experiencia profesional pero, sobre todo, en el conocimiento de idiomas. Además, la mayor parte de la bibliografía científico-técnica geológica y minera está en inglés. Hay que terminar el bachillerato hablando al menos otro idioma (tal y como se supone está previsto) pero muy especialmente el inglés.

Universidad

En España existen actualmente seis universidades que imparten la carrera de Geología (Granada, Salamanca, Madrid, Barcelona (2) y Oviedo). La mayor parte de los planes de estudio incluyen alguna especialidad en recursos minerales. Para un especialista en este campo, la carrera más adecuada debería incluir durante los dos primeros años asignaturas básicas como física, química, cálculo estadístico, informática, trigonometría, geometría en 3D y macroeconomía, además de las asignaturas geológicas de los dos primeros cursos.

En nuestra opinión, los conocimientos que deberían adquirir los estudiantes para poder ejercer como geólogo especialista en minería son:

- ▶ Sólidos conocimientos de geología general que incluyan cursos de mineralogía, petrografía sedimentaria, ígnea y metamórfica, geología estructural y geoquímica.
- ▶ También es fundamental la realización de trabajos de campo (cartografía básica y aplicada) en diferentes tipos de terrenos geológicos y, sobre todo, prácticas en empresas durante el verano.
- ▶ Cursos de introducción a la geofísica, geoestadística, hidrogeología, sedimentología y estratigrafía.
- ▶ Cursos de introducción a los yacimientos minerales, la minería, metalurgia, geopolítica, economía y geología ambiental.

Aunque no sea una asignatura de la carrera, para un geólogo que va a dedicarse a la industria minera, conviene mantenerse en buena forma física, por lo que hacer algún tipo de deporte es también recomendable para prepararse para un futuro empleo viajero y de campo.

Cada vez más las empresas (a escala mundial) piden que los geólogos a contratar tengan además de la licenciatura (grado según el plan actual), un máster o un doctorado. Si el aspirante se decide a realizar un máster, se debe escoger uno impartido por una facultad que, de algún modo, este especializada y tenga una amplia experiencia de trabajo en colaboración con las empresas mineras (investigación, desarrollo y consultoría). Actualmente, hay ya en marcha varios másteres en España en el campo de los recursos minerales. La Universidad de Oviedo propone el Máster Oficial en Recursos Geológicos y Geotecnia, un curso de 18 meses con cinco módulos obligatorios de 38 créditos (Materiales Geológicos, Dinámica de la Litosfera, Cuencas y Ambientes Sedimentarios, Métodos en Geología y Geología Aplicada a la Obra Civil), siete módulos optativos de 22 créditos (Variscan Massif Transect in the NW Iberian Peninsula, Aguas y Medio Ambiente, Caracterización y Prospección de Yacimientos, Combustibles Fósiles, Estructura y Geofísica del Subsuelo y Riesgos Geológicos y Dinámica del Relieve) y una tesis de máster de 30 créditos.

En el caso de pretender especializarse en geología de minas, la facultad o escuela debe disponer de cursos de minería, metalurgia extractiva, geoestadística y cálculo de reservas, ingeniería ambiental, diseño y cálculo de voladuras, etc. En todo caso los mejores geólogos de exploración que han descubierto nuevos yacimientos son aquellos que han trabajado en una mina o cantera, al menos, un par de años.

En la Universidad Complutense de Madrid, los estudios oficiales de postgrado incluyen un Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos también con 60 créditos, dentro del cual hay una especialidad de Recursos Minerales y Medio Ambiente.

La Universidad de Zaragoza ofrece un Máster de Iniciación a la Investigación en Geología que consta de un mínimo de 60 créditos, de los cuales 15 corresponden al trabajo de fin de Máster y 45 a las asignaturas programadas del Máster.

Además a nivel mundial son muy recomendables:

- ▶ Master of Mineral Resources (MMinRes). Universidad de Queensland, Australia.
- ▶ Masters of Business Administration (MBA) in Mineral Resources Management. Universidad de Dundee, Reino Unido.

Oportunidades de empleo

La industria minera mundial se encuentra hoy en un proceso de expansión. Sin embargo, cada vez hay menos geólogos especialistas en este campo, debido al rechazo social que la minería sufre. Por ello, las oportunidades de empleo son cada vez mayores a nivel mundial. En España, la minería sigue creciendo a pesar de las dificultades y cada vez son más empresas (en particular las multinacionales en el campo de la minería metálica y muy particularmente en el de los minerales industriales) que comprenden las ventajas de disponer de geólogos o departamentos de geología en sus canteras y minas.

El aumento de los precios de los metales hace que hoy la exploración de recursos minerales esté creciendo exponencialmente de manera global. Los profesionales que dominan idiomas tienen una gran ventaja en este apartado.

La satisfacción de haber encontrado un yacimiento y de llegar a ponerlo en explotación, o como en algunos casos, hacerse rico gracias a participar en la empresa (ahora son muy frecuentes las junior exploration companies, que cotizan en bolsa) es una parte considerable del orgullo de pertenecer a esta profesión de vocación multinacional. En muchas ocasiones, los geólogos mineros o de exploración que han tenido éxito en sus empresas como empleados pasan al negocio de la consultoría privada para asesorar a propietarios de fincas, empresas mineras e instituciones gubernamentales.

Otro campo de empleo emergente es el de investigadores científicos relacionados con los recursos minerales. En España, el Instituto Geológico y Minero de España o el CIE-MAT convocan regularmente plazas de investigadores (para doctores) y técnicos especialistas (para licenciados) en estos campos. También las universidades y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas convocan plazas de profesores o investigadores (sólo para doctores) dentro de los departamentos cuyas áreas de conocimiento se relacionan con los recursos minerales. Muchas empresas mineras ofrecen puestos de trabajo para este tipo de investigadores, bien en plantilla o en colaboraciones puntuales.

Otro aspecto importante para un profesional de la geología de minas es participar en organizaciones científicas y profesionales de su sector. En España, el ejercicio de la profesión está regulado y para ejercerla es preciso colegiarse en el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (www.icog.es) o, si existe, en el colegio autonómico correspondiente.

A nivel europeo, los colegios o asociaciones profesionales nacionales están agrupados en la Federación Europea de Geólogos (www.eurogeologist.eu), que coordina los esfuerzos internacionales en, por ejemplo, los Códigos Internacionales de Declaración de Reservas y Recursos a efectos de la valoración de empresas mineras en la bolsa.

Páginas web complementarias

Crismine-UCM. Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos: especialidad de Recursos Minerales y Medio Ambiente.

www.ucm.es/info/crismine/Master/Master_RRMM_MA.pdf

GEMM. Grupo de Estudios en Minería y Medio Ambiente.

www.uclm.es/users/higueras/portal_gemm/Portal.htm

Higueras, P. y Oyarzun, R. Curso de Minería y Medio Ambiente.

www.uclm.es/users/higueras/mam/

InfoMine. Mining Intelligence & Technology. www.infomine.com/

Minería Chilena. Revista. www.mch.cl/central.php

Oyarzun, R. Apuntes de Geología de Minas: Exploración y Evaluación.

www.ucm.es/info/crismine/Geologia_Minis/Geologia_Minis_portada.htm

Regueiro, M. y Marchán, C. La industria española de las rocas y minerales industriales.

www.ucm.es/info/crismine/Rocas_Minerales_Ind_Regueiro.pdf

El geólogo en la exploración y producción de hidrocarburos

Wenceslao Martínez del Olmo

Ex presidente de la Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles

Para qué sirve la geología del petróleo

Dado que es evidente que los hidrocarburos se generan, se mueven o migran, y se entrapan o acumulan en un yacimiento localizado en un preciso lugar geológico del subsuelo profundo, y que este subsuelo fue edificado por los procesos y leyes geológicas, la industria de los hidrocarburos ha venido a desarrollar una geología, un tanto especial, que se conoce como geología del petróleo.

Esta disciplina se nutre de todos los conocimientos y conceptos que, puramente geológicos, se ocupan o relacionan con las cuencas sedimentarias y sus mecanismos de deformación, pero también incorpora otras muchas herramientas que constituyen una fuente de datos, directos e indirectos, que pueden ser traducidos a procesos y atributos geológicos.

Los más significativos ejemplos de estas herramientas son los relativos a la interpretación de numerosos métodos geofísicos (sísmica de reflexión, gravimetría y magnetismo, principalmente), de los registros de propiedades físicas, naturales o inducidas, obtenidas desde la pared de los pozos profundos (radiactividad natural, resistividad, velocidad de una onda acústica, densidad, etc.) y de los análisis geoquímicos realizados tanto sobre muestras de superficie y pozo como en petróleos (contenido y tipo de materia orgánica, indicadores de maduración o de metamorfismo de muy bajo grado, cromatografía y espectrometría de masas, biomarcadores, etc.).

Este conjunto de ciencias de la Tierra, disciplinas, herramientas y datos, convenientemente adquiridos e interpretados, constituyen lo que comúnmente se conoce como geología del petróleo y ella conforma la base conceptual y operativa que es usada en la búsqueda y producción de los hidrocarburos líquidos y gaseosos.

Las líneas precedentes son más que suficientes para indicar cuál es el objeto de la geología del petróleo, pero quizá son insuficientes para mostrar su enorme importancia en un mundo tan dependiente de los hidrocarburos. Por ello, quizá conviene añadir que los hidrocarburos no son sólo fuentes de energía sino también el soporte de una industria química que, al igual que la energética, es necesaria para lo que ha venido a llamarse Estado o Sociedad del bienestar.

El impacto en este bienestar socioeconómico y los problemas derivados de las dificultades de encontrar nuevas reservas de hidrocarburos quedan reflejados en la figura 1, pues indica tanto la previsible demanda de hidrocarburos de nuestra sociedad como el alarmante desequilibrio existente entre el consumo y la incorporación de recursos nuevos o futuros, sea desde nuevos descubrimientos o desde mejoras en los viejos yacimientos.

La geología del petróleo es pues la herramienta creada por el hombre, mezcla de ciencia y tecnología que, inmersa en un proceso de investigación continua, trata de asegurar

Figura 1. Demanda prevista por tipo de combustible y previsiones de incorporación de nuevas reservas y producción-consumo

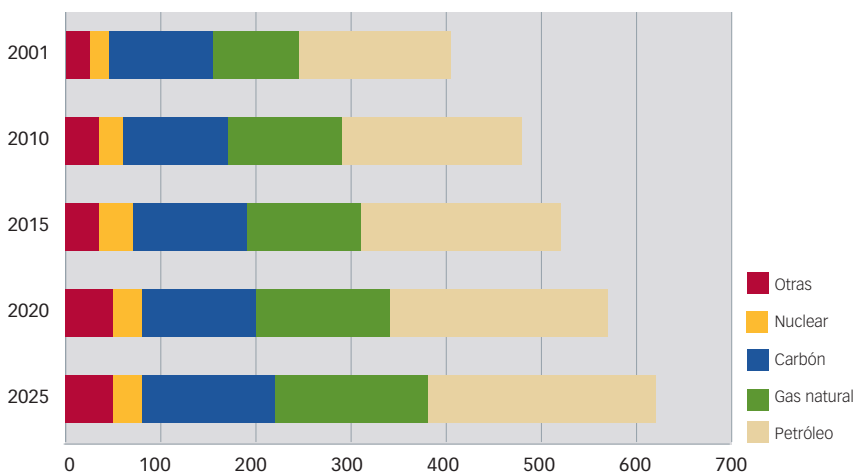
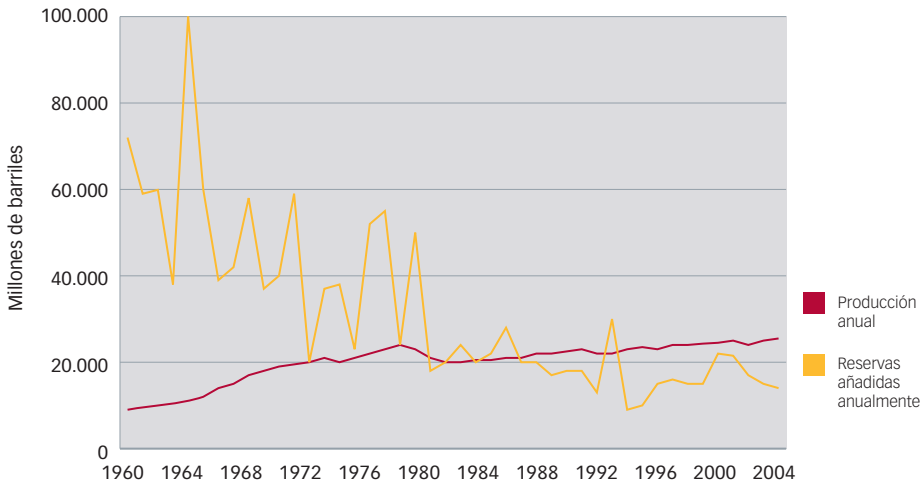


Figura 1. Demanda prevista por tipo de combustible y previsiones de incorporación de nuevas reservas y producción-consumo (cont.)



el abastecimiento en hidrocarburos que demandan tanto las sociedades del mundo industrializado como las que aún se encuentran en fase de desarrollo.

La demanda y dificultad de encontrar nuevos yacimientos son traducidas inmediatamente a precios del petróleo y del gas en el mercado global, circunstancia que obliga a que la geología del petróleo haya abierto un abanico de especializaciones, que se ocupan de encontrar y producir hidrocarburos del modo más económico posible, disciplinas que pueden ser resumidas y expresadas en:

- ▶ Geología de cuencas sedimentarias.
- ▶ Estratigrafía secuencial.
- ▶ Geología estructural.
- ▶ Geología de pozo.
- ▶ Diagrafías de pozo.
- ▶ Geoquímica orgánica o del petróleo.
- ▶ Interpretación geológica de los métodos geofísicos, especialmente de la sísmica de reflexión.
- ▶ Geología de yacimientos.

Especializaciones que además cuentan con la inestimable ayuda de otras disciplinas, no puramente geológicas, tales como las ingenierías de yacimiento y de superficie, la

perforación de pozos profundos en todas sus modalidades y el análisis de proyectos exploratorios desde una óptica puramente económica.

El trabajo que realiza y las herramientas que utiliza

Es así como la geología del petróleo, cuyo fin es encontrar y producir hidrocarburos, realiza multitud de trabajos que, procedentes de una base conceptual geológica y de distintas herramientas especializadas, se aplican o ponen en obra, en general auto-alimentándose y según requieren las diferentes fases de un proyecto exploratorio. Estas fases pueden resumirse en:

1. Nuevas áreas o definición de las zonas merecedoras de exploración futura. Trabajo, tanto técnico como económico que culmina en la firma de un contrato de exploración-producción entre la compañía y el gobierno del país al que pertenece el área previamente seleccionada.

Son tres las más usuales formas de acceder a un área o contrato que, desde una valoración exclusivamente técnica (expectativa de hallazgos, probabilidad de éxito y programas de trabajos necesarios) da paso a un concienzudo y también no exento de incertidumbres (futuros precios del barril y del dinero) estudio económico:

- a) Concursos internacionales promovidos por gobiernos soberanos, en los que la compañía que más ofrezca (pagos por firma del contrato, trabajos, inversiones y condiciones económicas del contrato en caso de éxito) será la ganadora del concurso y accederá a los derechos de exploración-producción del área en los términos fijados en el concurso y bajo la reglamentación jurídica-económica del país en cuestión.
Para dar una idea de la actual demanda de nuevas áreas prospectivas, baste añadir que muy recientemente se han otorgado algunas mediante el pago inicial de un bono de firma de mil millones de dólares y compromisos de trabajos de exploración por valor de otros cientos.
- b) Cesiones, compañía a compañía, sobre contratos firmados y activos, conocidos como farmouts. En ellos es muy usual que la compañía que accede, financie el doble del porcentaje de participación adquirido del futuro programa de trabajos, programa que casi siempre es referido a sondeos de exploración por realizar.
La valoración técnica y económica de las numerosas ofertas de farmout que aparecen en el mercado llegan a ocupar un 20-25 por ciento del trabajo de los equipos de exploración.
- c) Negociación directa con gobiernos, caso cada vez menos posible, por causa de la enorme competencia creada entre las compañías de exploración-producción, y el convencimiento de los gobiernos de que un concurso es una buena oportunidad para obtener mejores condiciones contractuales para el país al que representan.

2. Operaciones de exploración en áreas bajo contrato. Contratos que siempre incluyen obligaciones de trabajo (sísmica y pozos), tiempos de realización e inversiones financieras. Esta fase comporta la realización de las diferentes operaciones que son necesarias para cumplir el contrato y alcanzar el éxito o el fracaso:

- a) Obtención de los informes-estudios de impacto ambiental necesarios para todas y cada una de las operaciones previstas en el programa exploratorio.
- b) Geología de campo, hoy, usualmente a la búsqueda de datos muy precisos, especialmente relacionados con atributos y modelos sedimentarios de las formaciones previamente definidas como objetivos preferenciales, valoración de rocas madre mediante muestreos sistemáticos y recogida de todo tipo de observaciones que ayuden a la interpretación estructural.

Otro de los usuales trabajos de campo radica en la llamada geología de análogos, que no es otra cosa que la búsqueda y caracterización de afloramientos que, ya sean próximos o muy alejados del área bajo contrato, puedan ser usados como modelo geológico de imágenes sísmicas o de yacimientos ya descubiertos y realizados en cualquier tipo de medio sedimentario: fluviales, deltas, turbiditas, arrecifes, etc.

Cuando lo que se busca es la correlación con una imagen sísmica, se pretende estimar el volumen de roca almacén que a ella puede asignarse, mientras que cuando se busca la correlación con un yacimiento, se investiga tanto la geometría-volumen de los cuerpos almacén y los cambios de porosidad-permeabilidad que inducen sus pautas sedimentarias, como el grado de conexión o desconexión que entre ellos existe.



Figura 2. Adquisición de campañas sísmicas en desierto (vibro), mar (sísmica 3D) y selva (pozos someros) en un entorno difícil.



- c) Planificación, disparo y procesado de las campañas sísmicas necesarias. Campañas puestas en obra por contratistas especializados, conocidas como Compañías de Servicios, pero en las que las compañías operadoras han de velar por su calidad, su exacta localización geográfica, su mejor definición a la profundidad de los objetivos exploratorios y su precio.
- d) Interpretación de la sísmica para obtener tanto la definición y valoración de las trampas merecedoras de sondeos como un sinfín de datos nuevos relativos al registro sedimentario de la cuenca y sus estilos y pautas de deformación. Es una fase puramente interpretativa en la que se trata de estimar las reservas potenciales de todo tipo de posibles trampas (estructurales puras, estratigráficas y mixtas), los objetivos de los sondeos exploratorios, la secuencia de perforación más adecuada para obtener información geológica dudosa o desconocida y el riesgo o probabilidades de hallazgo que cada uno de estos sondeos comporta.
Como en el caso de las nuevas áreas, la información técnica es la base de nuevos estudios económicos.
- e) Previsión geológica de la columna que reconocerá el sondeo exploratorio: definición y profundidad de los objetivos, problemas potenciales derivados de niveles con pérdidas de circulación de lodo, sobrepresiones, intervalos de muestreo, etc.

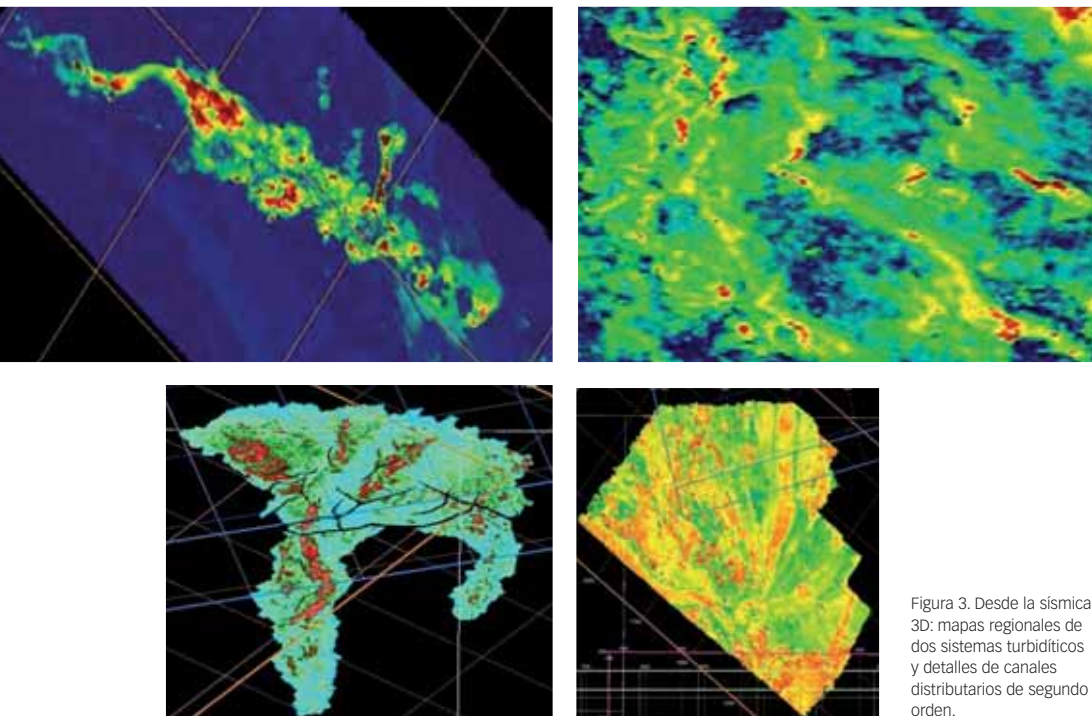


Figura 3. Desde la sísmica 3D: mapas regionales de dos sistemas turbidíticos y detalles de canales distributivos de segundo orden.

y programas fijos u opcionales de diagráfias de pozo, en función de los resultados obtenidos durante y después de la perforación del sondeo.

Este informe de implantación de pozo trata de no dejar nada a la improvisación o la sorpresa y recoge todos los objetivos exploratorios y geológicos que se pretenden obtener del mismo. Es evidente que en función del grado de exploración previa del área en que nos encontremos (sondeos próximos, calidad de la información sísmica disponible, etc.) el informe de implantación incluirá un mayor o menor número de incertidumbres, y es por esta suerte por lo que podremos encontrar desde sondeos puramente estratigráficos a sondeos que buscan un objetivo muy preciso, por productivo y conocido.

- f) Programa de perforación más adecuado, construcción de accesos al lugar elegido y búsqueda-contratación del equipo y de los materiales necesarios, y algo tan importante como la implementación de medidas de seguridad para las personas, el medio ambiente y los equipos de perforación.



Figura 4. Operaciones de perforación en selva, desierto y mar.

- g) Control geológico del pozo en todas sus variantes: temperatura, salinidad y resistividad de entrada y salida del lodo, indicios de hidrocarburos registrados durante la perforación, descripción geológica de las formaciones cortadas, empaquetado de las muestras o rípios de perforación, velocidad de avance, registro de pérdidas y

ganancias de lodo, control de la presencia de gases venenosos, descripción de testigos convencionales, calidad del programa de diagráfias, control de la trayectoria del sondeo, etc.

El geólogo responsable de este control deberá informar continuamente de las desviaciones que entre la realidad del pozo y el informe de implantación se vayan sucediendo, mantendrá una continua comunicación con el ingeniero de perforación y deberá velar por la consecución de todo el programa de investigación asignado al pozo.

- h) Control tiempo sísmico-profundidad en sus diversas variantes operativas.
- i) Informe final de todos los datos y resultados obtenidos por el sondeo.
- j) Y finalmente, algo que acompaña a todo el programa operacional con una frecuencia de una-dos veces por año, la preparación y ejecución de los llamados Comités Técnicos y de Operaciones. Reuniones en las que la compañía operadora, responsable de llevar adelante los trabajos, presenta, propone y discute con las compañías asociadas los resultados obtenidos y los trabajos-presupuestos a realizar el próximo año.

3. Programas de trabajo futuro en los casos en que no se realizaron descubrimientos o se realizó alguno que necesita una valoración más precisa.

Análisis de las causas del fallo y propuestas de abandono del área o de continuar la exploración con nuevos trabajos e inversiones, apoyados en los iniciales conceptos exploratorios o en diferentes ideas u objetivos nacidos de los nuevos datos geológicos y geofísicos provistos por la fase de trabajos que acaba de realizarse.

Un sondeo es siempre una fuente de información geológica y ésta necesita integrarse en la concepción y valoración del área objeto de exploración. ¿En qué y por qué nos equivocamos, qué hemos aprendido, y en qué medida estos nuevos datos modifican la probabilidad de hallazgo asignada al proyecto?

Localización de nuevos sondeos que tratarán de evaluar la dimensión de un descubrimiento realizado, pues conocer el volumen de los hidrocarburos contenidos en el descubrimiento y los que de ese total en subsuelo podremos extraer a superficie, frecuentemente necesita de un número variable —según tamaño del yacimiento— de nuevos pozos llamados de apreciación. Son nuevos pozos que definirán los límites exactos del yacimiento, las variables petrofísicas (porosidad y permeabilidad) y las barreras estructurales (fallas y discordancias) que a pequeña escala afectan a los cuerpos de roca almacén impregnados en hidrocarburos.

Aunque suele decirse que el petróleo y el gas recuperable de un yacimiento sólo se sabrá cuando se produzca el último barril o metro cúbico, esta evaluación previa es de

suma importancia para el proyecto de desarrollo comercial del yacimiento, ya que éste implica cuantiosas inversiones que no es raro que alcancen cifras de varios miles de millones de euros.

4. Desarrollo comercial de los descubrimientos realizados. Trabajo consistente en llevar el hidrocarburo a los mercados al menor costo posible: número de pozos necesarios, localización de los mismos, plantas de tratamiento del crudo o el gas, oleoductos-gasoductos, puertos de embarque y complejos trabajos de tratamiento-inyección de aguas contaminantes, y de conservación y restitución del medio durante la explotación y cuando finalice la vida del yacimiento.

Estas cuatro fases —diríamos que clásicas— de la actividad exploratoria, se apoyan y nutren de esas especializaciones que en párrafos anteriores fueron esquemáticamente enunciadas y que ahora pasamos a describir con más detenimiento:

- ▶ Geología de pozo. Dedicada al control geológico, instantáneo y diferido, de todos los atributos geológicos de la columna cortada en un sondeo de exploración o producción. El control instantáneo es la base de la prevención de las peligrosas, y por ello no deseadas, erupciones a superficie de petróleo, gas o incluso agua.
- ▶ El control diferido es la elaboración de un informe final que reunirá tanto lo provisto por los ripios y lodo de perforación como lo facilitado por las diagrfías de pozo y las operaciones dedicadas a la exacta correlación entre la profundidad y el tiempo sísmico.
- ▶ Interpretación geológica de las numerosas diagrfías que se registran en un pozo. Se ocupa de establecer la traducción a datos geológicos de las diferentes y numerosas medidas eléctricas, acústicas, magnéticas, radioactivas y nucleares, procedentes de estos registros de pozo. Trabajo especialmente dedicado a la identificación y valoración de rocas almacén y rocas sello, cuantificación de las zonas impregnadas en

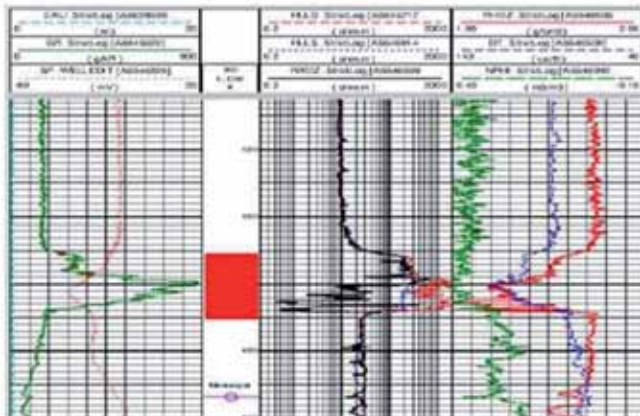


Figura 5. Caracterización de una roca madre desde las diagrfías de pozo.

hidrocarburo (tipo, porcentajes de hidrocarburo y agua contenidas en la porosidad), caracterización de fracturas y micro-fracturas, de medios sedimentarios y su ordenación en secuencias de depósito, obtención de datos estructurales (buzamientos, fallas, pliegues, discordancias), identificación de rocas madre de hidrocarburos y un largo etc. Conjunto de datos que trata de convertir la sección cortada por un pozo en un afloramiento al que se le extrajeran todos los atributos geológicos que contiene y las zonas mineralizadas o impregnadas en hidrocarburo.

- ▀ Valoración de muestras y procesos, procedentes de pozo o de afloramiento, de rocas generadoras de hidrocarburos o rocas madre, lo que se suele conocer como geoquímica del petróleo y de la que podemos diferenciar dos técnicas y trabajos diferentes: la geoquímica puramente analítica y la geoquímica geológica. La primera trata de estimar la riqueza de las muestras, el tipo de materia orgánica que contienen, el tipo de hidrocarburo que expulsarán, el grado de madurez que poseen, la correlación de petróleos con petróleos y de éstos con rocas madre. La segunda o geológica, reúne los datos precedentes y los traslada e integra en la historia geológica de la cuenca para conseguir informaciones tales como: medio sedimentario de depósito de la roca madre y su previsible continuidad paleogeográfica, condiciones de enterramiento (tiempo y temperatura) en que la roca madre alcanzó, o si no lo hizo, alcanzará las ventanas de expulsión de petróleo y gas en otro lugar de la cuenca sedimentaria, localización de este lugar, eventos térmicos ocurridos, evaluación de la magnitud de los procesos erosivos y un largo etc., que busca situar, en el tiempo y en el espacio, la cocina o cocinas de hidrocarburos, las vías de migración de éste hacia las trampas y la relación temporal entre la edad de la migración o migraciones y la edad de la trampas.



Figura 6. Utilización de imágenes satélite para localizar escapes de petróleo en grandes superficies marinas.

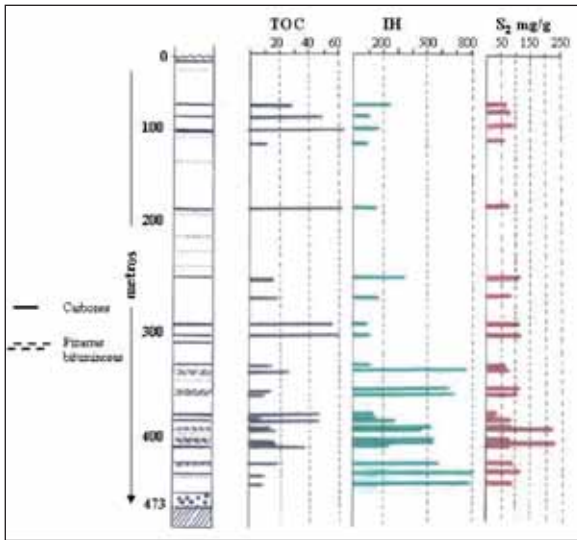


Figura 7. Valoración de una roca madre mediante contenido en carbono orgánico y pirólisis.

- Interpretación geológica, estructural y sedimentaria, de las imágenes provistas por las líneas sísmicas: tipo, edad y volumen de las trampas, identificación de medios sedimentarios y de los almacenes y sellos que pueden contener. Dada la notable calidad alcanzada por las líneas sísmicas modernas, especialmente por los programas conocidos como sísmica en tres dimensiones (3D), puede afirmarse que la traducción de sus imágenes a información geológica (sedimentológica, paleogeográfica y estructural), ocupa hoy una de las mayores dedicaciones de los profesionales de base geológica. Es así como, desde hace una decena de años, las compañías de exploración-producción dedican a sus geólogos y geofísicos a trabajar-interpretar en equipo, si bien y en general, el geofísico se ocupa de la adquisición y procesado de las campañas sísmicas y el geólogo de la traducción de sus imágenes a toda la amplia gama de datos geológicos que de ellas pueden obtenerse. Puede entonces decirse que geología y geofísica son inseparables y que ambas son el núcleo y motor de la moderna exploración de hidrocarburos.
- Interpretación de datos, a escala de cuenca, procedentes de gravimetría y magnetismo. Métodos cada vez más en desuso, por el simple hecho de que las cuencas sedimentarias del planeta poseen ya un elevado grado de información, de gran escala o regional, procedente de mapas de superficie, líneas sísmicas y pozos, y porque estos métodos de penetrar-interpretar el subsuelo profundo, son mucho menos precisos que los facilitados por la sísmica de reflexión. Puede así afirmarse que no encontraremos un sondeo perforado en los 30 últimos años que no haya sido propuesto mediante el concurso de la sísmica de reflexión.
- Geología de yacimiento. Especialmente dedicada a la más precisa caracterización sedimentaria de los almacenes mineralizados en hidrocarburos. Se trata de miniaturizar la

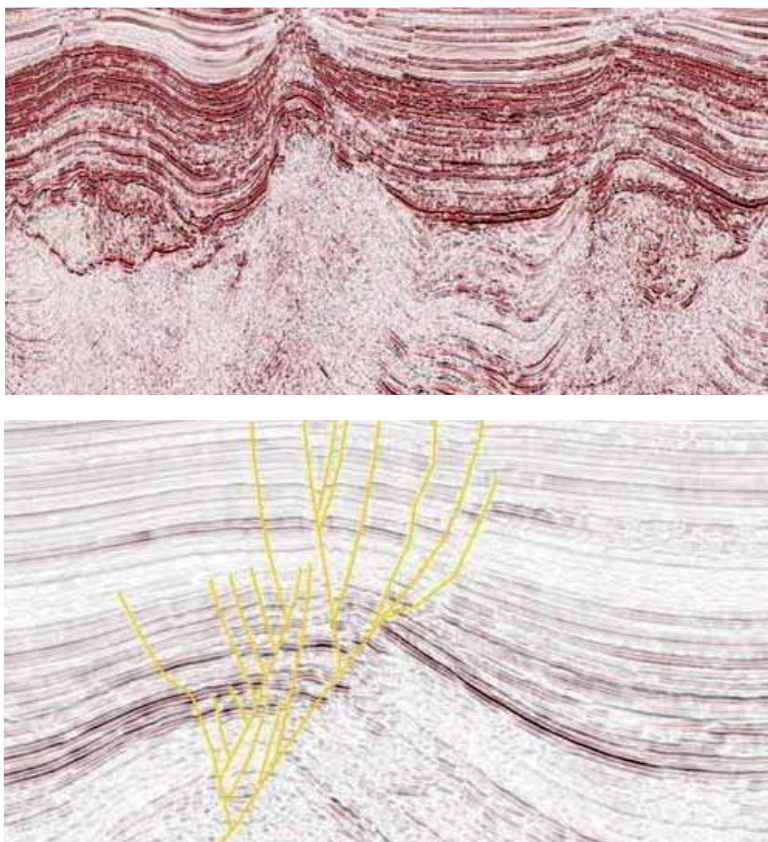


Figura 8. Imágenes sísmicas de un sistema cabalgante de piel fina y de una cuenca con diapirismo salino profundo.

geometría y volumen de los cuerpos rocosos que significan almacén impregnado en hidrocarburo, de las heterogeneidades que, ya sea por su medio sedimentario de depósito o por las impuestas por la deformación tectónica, significan barreras de permeabilidad entre ellos. Cada una de estas barreras de las líneas de flujo del hidrocarburo hacia los pozos de producción, significará la necesidad de perforar más pozos para producir el petróleo y el gas contenido en el yacimiento. Conocer y definir la posición del número de pozos necesarios y el volumen y las características del almacén impregnado que drenará cada pozo de producción son objetivos de esta disciplina, conocida como geología de yacimiento, que precisa de una estrecha colaboración entre el geólogo y el ingeniero de yacimientos.

- ▶ Geología integral o de cuenca que, realizada por profesionales no especialistas pero con conocimientos de todo lo anterior, se ocupan de interpretar el contenido global de una cuenca sedimentaria y localizar las reducidas áreas de la misma, donde es probable que se encuentren los yacimientos de hidrocarburos.

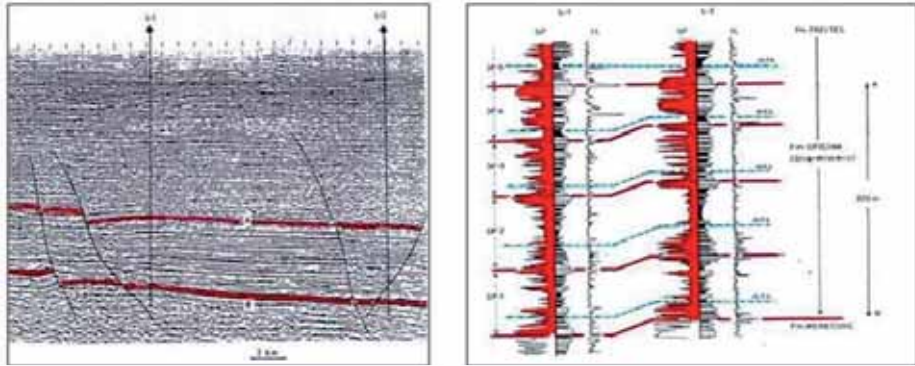


Figura 9. Arenas petrolíferas y su individualización-correlación mediante la definición de secuencias de depósito.

Se podría decir que sobre esta actividad recae el inicio y el fin de la exploración, pues es ella la que debe proveer de: las áreas prospectivas, el potencial de recursos que pueden contener, la planificación y valoración de los trabajos e inversiones necesarias para alcanzar esa expectativa de recursos, y la cuantificación del riesgo geológico, expresada en probabilidad de éxito del programa exploratorio, que los datos e interpretaciones manejadas involucran.

Hoy, ya no se pide a un geólogo la realización de un informe meramente geológico-exploratorio, sino que se exige la discusión y valoración numérica de la probabilidad de presencia de las seis condiciones necesarias para que exista un yacimiento:

- ▲ Roca madre activa. Generación y expulsión de hidrocarburos desde un volumen de cuenca conocido como cocina.
- ▲ Almacén. Roca porosa y permeable que lo almacene y permita producirlo.
- ▲ Vía de migración. Comunicación útil entre la cocina y el almacén.
- ▲ Sello. Roca impermeable que envuelva el almacén y detenga la migración hacia la superficie del hidrocarburo.
- ▲ Trampa. Volumen de almacén cerrado por el sello, creado en una edad anterior a la edad de la migración del hidrocarburo.
- ▲ Conservación. Ausencia de todo tipo de procesos geológicos que puedan haber destruido el viejo yacimiento.

La probabilidad final será el producto de las probabilidades individuales, luego si una sola falla, es cero y no habrá yacimiento.

A pesar de la enorme dificultad que tales condiciones representan, los precios del gas y el petróleo en los mercados mundiales y los miedos a la falta de abastecimiento han llevado a que la histórica actividad exploratoria sobre las cuencas sedimentarias del

planeta haya sido tan intensa que su alto grado de exploración, millones de pozos, traduce una creciente y añadida dificultad para encontrar nuevos yacimientos. Tal es así, que podemos resaltar que todo el desarrollo científico y tecnológico introducido en las cuatro últimas décadas por esta moderna geología del petróleo, ha sido mucho menos eficaz o productivo que el viejo concepto exploratorio de la trampa creada por un anticlinal. Esta afirmación viene contrastada por el hecho de que el 50-60 por ciento de todos los hidrocarburos descubiertos, ya consumidos o por consumir, fueron encontrados en la primera mitad del siglo pasado con la sencilla herramienta del mapa geológico de superficie y rudimentarios métodos geofísicos. Esta observación viene a explicar por qué las compañías han ido abriendo caminos a medida que se desarrollaban nuevas tecnologías capaces de llevar los conocimientos geológicos y los equipos a las cuencas no exploradas: primero las llanas y cubiertas selvas, segundo las plataformas marinas y hoy las aguas profundas y ultra-profundas (3.000 metros) de los márgenes continentales.

Esta necesaria diversificación y especialización de conocimientos hace que podamos resumir que las compañías de exploración y producción se preocupen de procurar una formación completa y diversa a los geólogos del petróleo que en ellas trabajan, y para ello nada mejor que rotarlos o hacerlos pasar sucesiva y cíclicamente por todo lo que incluyen las actividades que en la industria se conocen como operaciones de exploración, nuevas áreas, análisis de proyectos, síntesis de cuencas y yacimientos. Esta formación profesional, que las compañías procuran dar a sus geólogos, es bastante usual que les lleve a un desarrollo profesional que esquemáticamente se puede resumir en los siguientes pasos:

- ▶ Asistencia a cursos en los que se trata de mostrar los conceptos, valores, aplicaciones y programas informáticos relativos a algunas de las herramientas propias de la industria: geoquímica, petrofísica y sedimentología desde las diagrfias de pozo, interpretación sísmica y control geológico de un pozo, yacimientos, cálculos de reservas y riesgos, etc.
- ▶ Estancias como asistente y posteriormente como responsable del control geológico de pozo.
- ▶ Integración en un equipo de trabajo de nuevas áreas o de operaciones de exploración, tanto en las oficinas centrales como en cualquiera de los países donde la compañía es activa.
- ▶ Asignación como responsable y, más tarde, como jefe de exploración de uno de estos equipos.

A partir de este último empleo, un geólogo del petróleo se verá obligado a elegir entre su continuidad en la rama técnica o su paso a la rama de gestión.

Conocimientos que aporta

Una vez que se ha definido el objeto de la geología del petróleo y descrito el trabajo que realiza, vamos a tratar de expresar los conocimientos que ella aporta, cosa que haremos desde dos vertientes muy diferentes. Primero, con una mirada retrospectiva al progreso geológico que ha promovido y, segundo, a lo que el conocimiento de los recursos disponibles significa en la planificación de las economías de los países en vías de desarrollo o ya desarrollados.

La dificultad inherente al subsuelo profundo y la pujanza de la industria de los hidrocarburos promovió necesidades de todo tipo, que sin duda han contribuido notablemente al progreso de la ciencia geológica. Ejemplos muy significativos de estos conocimientos que inició la geología del petróleo y que hoy son usuales, diríamos que obligados en los trabajos geológicos, pueden ser resumidos como sigue:

- ▶ El pequeño tamaño de las muestras de pozo obligó al desarrollo de la micropaleontología en sus diversas variantes: foraminíferos primero, y más tarde nanoplancton, pólenes, etc. Era ésta la única forma de poder asignar una edad a los sedimentos cortados por un pozo exploratorio.

La biocronoestratigrafía como herramienta básica de correlación entre pozos, y entre éstos y los afloramientos.

- ▶ La creciente calidad de las líneas sísmicas de reflexión promovió el progreso conceptual derivado de los cambios de nivel marino y lo que ello implica en la organización y distribución de los sedimentos. Curvas eustáticas y secuencias de depósito significaron una revolución geológica en la interpretación de las columnas sedimentarias y todo ello nació de un grupo de geólogos del petróleo y de su intento de aproximar edades de los sedimentos, a partir de la información transmitida por las líneas sísmicas.

Un nuevo paso en el campo de la sedimentología se realizó cuando la sísmica tridimensional nos permitió visualizar, sobre grandes superficies, las pautas de distribución rocosa de numerosos medios sedimentarios, muy especialmente a los que genéricamente conocemos como de aguas profundas. La necesidad de conocer la geometría, distribución y conexión o desconexión de los cuerpos que significan una roca almacén, obligó a este esfuerzo investigador, cuyo progreso se ha extendido a una importante rama de lo que hoy se llama o conoce como geología marina.

También y desde esta calidad sísmica se ha dado un paso de gigante en la visualización e interpretación de los sistemas de deformación, contractivos, extensivos y salinos, desde profundidades hace años impensables hasta niveles superficiales, a los que no por ser más accesibles a nuestra observación en campo, acabábamos de comprender. Un ejemplo muy significativo de este progreso geológico puede

expresarse en el hecho de que la deformación halocinética y halotectónica ha creado una base conceptual y diferenciado una nomenclatura estructural exclusiva de la geología del petróleo: *mock*, *turtle back*, *weld*, *salt window*, *overhang*, *toe thrust*, *minibasin*, *grow fault* etc.

- ▶ La geoquímica del petróleo promovió dos conocimientos que por sorprendentes podrían calificarse de ciencia ficción. Ellos son los biomarcadores o herencia genética impresa en los hidrocarburos líquidos de organismos extinguidos millones de años atrás, y los termómetros con reloj que representan las huellas de fisión de los apatitos contenidos en los sedimentos detríticos.

Si a ello unimos los conocimientos derivados de lo que podríamos calificar de metamorfismo de muy bajo grado, se ha ampliado considerablemente la escala de entendimiento de los procesos tiempo-presión-temperatura a los que son sometidos los sedimentos de una cuenca.

- ▶ De otra parte, esta vez, más económica que científica, la geología del petróleo permite visualizar, y quizá planificar, un futuro energético. Para ello sólo hay que tomar en consideración las cifras relativas a la distribución geográfica de las reservas

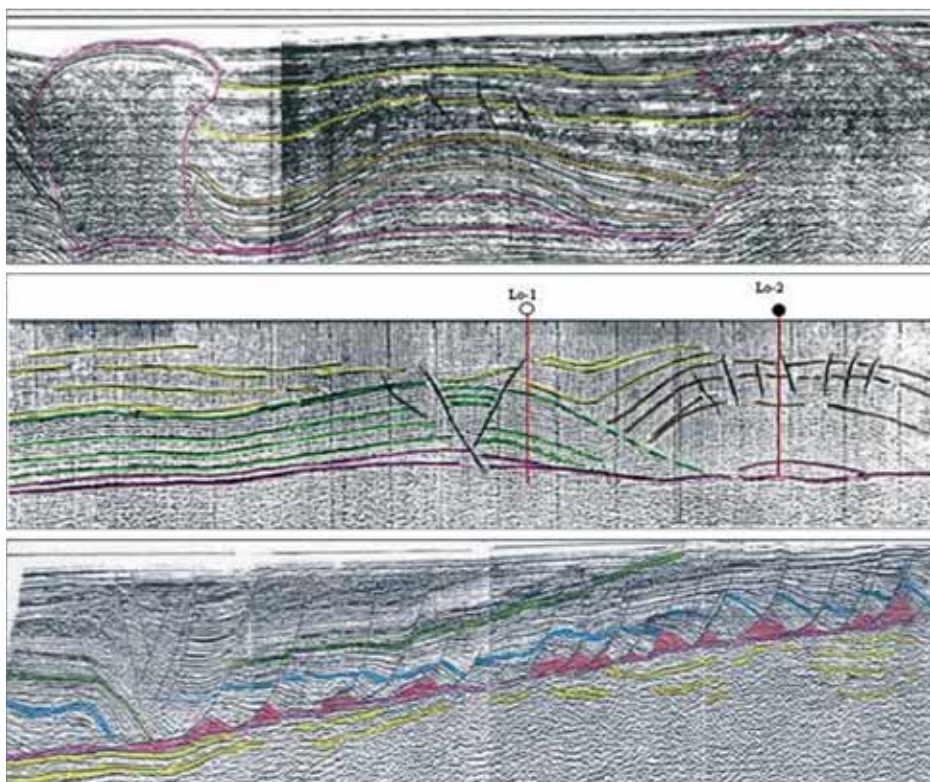


Figura 10. Nomenclaturas de la deformación salina (diapiros pasivos, *turtle backs*, *mocks*, *salt windows*, *rollers* y *rafts*) introducidas por la geología del petróleo.

mundiales de petróleo y gas que periódicamente son publicadas por la industria. Si estas se combinan con la previsión, siempre azarosa, de la incorporación vía exploración de nuevos recursos, quizá podamos entender el porqué del espectacular desarrollo como fuente energética del limpio gas natural.

- ▶ Y como hemos hablado del menos contaminante gas natural, merece la pena indicar que se emplean las mismas técnicas que la geología del petróleo puso a punto y utiliza, tanto para el almacenamiento subterráneo de esta fuente energética como reservas estratégicas y de consumos punta, como para el secuestro e inyección de los gases de efecto invernadero, como el preocupante CO₂, los residuos de nuestras centrales nucleares o la llamada hidrogeología profunda. ¿Qué sería de éstos sin las herramientas y técnicas facilitadas por la geología del petróleo?

Profesionales con los que se relaciona

Como el trabajo de abastecer al mundo de esa materia, no renovable, que personanizan los hidrocarburos, es demasiado complejo y precisa de las grandes inversiones que representan las operaciones de exploración y producción, las compañías han tratado y tratan de reducir los llamados costos de encontrar, desarrollar y producir hidrocarburos. Y nada parece más apropiado para ello que interconectar y responsabilizar a las ciencias y tecnologías más adecuadas: geología-geofísica, ingeniería, economía y, recientemente, informática. Es de esta forma por lo que hoy un geólogo del petróleo no es un especialista aislado en un mundo exclusivamente geológico, pues ha de integrarse en equipos multidisciplinares que reúnen profesionales de muy diferente procedencia académica. Por razones lógicas que no es preciso expresar, es evidente que los grados de comunicación interprofesional serán muy diferentes, pues nunca será tan estrecha la comunicación entre geólogos, geofísicos e ingenieros de yacimientos y de perforación, como la existente entre este grupo de profesionales y otros dedicados a temas tan necesarios y a la vez distantes, tales como economistas, biólogos, químicos, informáticos, geógrafos y jurídicos, entre otros muchos.

De otra parte, una de las relaciones profesionales más atractiva por lo que de intercambio de culturas significa, es sin duda la provista por la frecuente discusión-colaboración con geólogos de múltiples nacionalidades que trabajan en la propia compañía o en otras compañías e instituciones. Aunque el apelativo de multinacional no provenga de aquí, es evidente que el conglomerado multiétnico y los viajes o estancias en países tan tanto exóticos, en el que un geólogo del petróleo se encuentra inmerso, representan una fuente de riqueza técnica y cultural que va mucho más allá de la que puede obtenerse con la asidua lectura de las revistas especializadas.

Principales clientes

Para ultimar esta ya larga visión de la geología del petróleo, podríamos preguntarnos quiénes son los principales clientes y beneficiarios de esta larga serie de tareas que, sea de forma individual o en equipo, ocupan la vida profesional de un geólogo. La respuesta a esta pregunta podríamos reducirla a tres grandes grupos, que por orden de importancia serían:

- ▶ La sociedad, tan necesitada de esa energía e industria química que proviene de los hidrocarburos. El mantenimiento o acceso al llamado Estado del bienestar.
- ▶ Las compañías, privadas, mixtas o públicas, que obtienen considerables beneficios que no serían sostenibles sin esos primer y segundo paso que personalizan la exploración y la producción.
- ▶ Y por último, las llamadas ciencias de la Tierra, por lo que, con menos frecuencia de lo que nos gustaría, hay de transferencia de conocimientos entre la industria y la academia.

Finalmente, nos gustaría añadir que la geología del petróleo es una actividad que, aunque no exenta de desilusiones —pues no hay nada que duela más que un pozo seco— es capaz de llenar toda una vida profesional en la que ni la rutina ni la monotonía suelen tener cabida.

Referencias bibliográficas

Allen, J. R. L. (1982). *Sedimentary Structures: their character and physical basis. Development in Sedimentology*. 2 vols. Elsevier Co. Amsterdam.

Anderson, R. O. (1984). *Fundamentals of petroleum industry*. Universidad de Oklahoma.

Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo. Libro XXV Aniversario. AGGEP / W. Martínez del Olmo (eds.).

Baker, R. (2001). *A primer of oilwell drilling. A basic text of oil and gas drilling*. Houston, PETEX & IADC.

Bally, A. W. y Snelson, S. (1980). *Realms of subsidence*. Miall, D. A. (ed.). *Facts and principles of world petroleum occurrences*. Canada. Soc. Petroleum Geol. Mem. 6: 9-94.

Berg, O. R. y Woolverton, D. G. (1984). *Seismic Stratigraphy II. An Integrated Approach to Hydrocarbon Exploration*. AAPG. Mem. 39.

Bidle, K. T. (ed.) (1991). Active Margin Basins. AAPG. Mem. 52: 324.

Bouma, A. H.; Normark, W. R. y Barnes, N. E. (eds.) (1985). Submarine fans and Related Turbidite Systems. Springer-Verlag, Nueva York.

Clopine, W. C.; Lane, R. H. y Vork, D. (1995). Biostratigraphy: Adding Value to the Exploration and Development Process. AAPG. Bull. 79: 13, 17.

Dahlstrom, C. D. A. (1969). Balanced cross-sections. Canada. Journ. Earth Sciences 6: 743-754.

Davison, J.; Alsop, G. I. y Blundell, D. J. (1996). Salt tectonics: some aspects of deformation mechanics. Geol. Society Spec. Public. 100: 1-10.

De Chazneau, M. G. y Khan, E. (1959). Integration and competition in the petroleum industry. Universidad de Yale.

Demaison, G. J. y Moore, G. T. (1984). Anoxic environments and oil source beds genesis. AAPG. Bull. 64: 1179-1209.

Faugères, J. y Stow, D. A. V. (1993). Bottom current controlled sedimentation: a synthesis of the contourite problem. Sediment. Geol. 82: 287-297.

Faugères, J.; Stow, D. A. V.; Imbert, P. y Viana, A. (1999). Seismic features diagnostic of contourite drift. Marine Geology 162: 1-38.

Fleisher, R. L. y Lane, H. R. (1999). Applied Paleontology. Beaumont, E. A. y Foster, N. H. (eds.). Treatise of Petroleum Geology / Handbook of Petroleum Geology: Exploring for Oil and Gas Traps. AAPG, Tulsa, cap. 17.

Greene, W. (1982). Strategies of the major oil companies. Universidad de Michigan Research, Ann Arbor.

Haq, B. U.; Hardenbol, J. y Vail, P. R. (1987). Chronology of fluctuating sea level since the Triassic. Science 235: 1156-1166.

Harding, T. P. (1974). Petroleum traps associated with wrench faults. AAPG. Bull. 58: 1290-1304.

Harding, T. P. y Tuminas, A. C. (1988). Interpretation of footwall fault traps sealed by reverse faults and convergent wrench faults. AAPG. Bull. 72: 738-757.

Hossack, J. (1995). Geometric rules of section balancing for salt structures. AAPG. Mem., 65: 29-40.

Hunt, J. M. (1996). Petroleum Geochemistry and Geology. (2ª ed.) Freeman, Nueva York.

Irwin, H. y Meyer, T. (1990). Lacustrine organic facies. A biomarker study using multivariate statistical analysis. Organic Geochemistry 16: 176-210.

Isaaka, E. y Srivastava, M. (1989). Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, Nueva York.

Jackson, M. P. A. (1995). Retrospective salt tectonics. AAPG Memoir 65: Salt Tectonics. A Global Perspective: 1-28.

Jackson, M. P. A. y Vendeville, B. C. (1994). Regional extension as a geologic trigger for diapirism. Geol. Soc. America Bull. 196: 57-73.

Jackson, M. P. A.; Vendeville, B. C. y Schultz-Ella, D. (1993). Structural dynamics of salt systems. Annual Review of Earth & Planet. Scien. 22: 1-18.

Klemme, H. D. (1980). Petroleum basins-classifications and characteristics. Journal Petroleum. Geol. 23: 30-66.

Klemme, H. D. y Ulmishek, G. F. (1989). Depositional control, distribution, and effectiveness of world's petroleum source rocks. AAPG. Bull. 73: 372-373.

Kuenen, P. H. (1964). Deep-sea sands and ancient turbidites. Bouma, A. H. y Brouwers, A. (eds.). Elsevier Co. Amsterdam, 3-33.

Letouzey, J.; Colletta, B.; Vially, R. y Chermette, J. C. (1995). Evolution of salt-related structures in compressional settings. AAPG. Mem. 65: 29-40.

Lopatin, N. V. (1971). Temperature and geologic time as factors in coalification. Akad, Nauk, SSSR. Serv. Geol. 3: 95-106.

Magoon, L. B. y Dow, L. G. (1994). The Petroleum system-from source to trap. AAPG Bull. Memoir 60.

- Martínez del Olmo, W. (2006). ¿El fin del petróleo? Comunidad Autónoma de Madrid.
- Martínez del Olmo, W. (2008). Almacenes geológicos de C₁ y CO₂. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid.
- Mauduit, T.; Guerin, G.; Brun, J. P. y Lecanu, H. (1997). Raft tectonics: the effects of basal slope angle and sedimentation rate on progressive extension. *Journal. Struct. Geolgy.* 19: 1219-1230.
- Meyer, M. L. y Nederlof, B. H. (1984). Identification of source rocks on wireline logs by density / resistivity and sonic transit time / resistivity crossplots. *AAPG. Bull.* 69: 1255-1268.
- Mitcchum, R. M. Jr. (1985). Seismic stratigraphic expresion of submarine fans. *AAPG. Mem.* 39: 117-136.
- Mitcchum, R. M. Jr.; Vail, P. R. y Sangree, J. B. (1977). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level. *AAPG. Mem.* 26: 117-143.
- Mutti, E. (1985). Turbidite system and their relations to depositional sequences. *Reidel Publ.* 65-93.
- Mutti, E. (1992). Turbidite sandstones. *Agip / Instituto Geol. Univ. Parma*, 275.
- Odell, P. R. (1964). *Oil and world Power: Background of the oil crisis.* Viking Penguin, Nueva York.
- Ori, G. G. y Friend, P. F. (1984). Sedimentary basins, formed and carried piggyback on active thrust sheets. *Geology* 12: 475-478.
- Owen, E. W. (1975). *Trek of the oil finders: A history of exploration for oil.* AAPG, Tulsa.
- Parrish, J. T. (1982). Upwelling and petroleum source beds, with reference to the Paleozoic. *AAPG. Bull.* 66: 750-774.
- Payne, S. N. J.; Ewen, D. F. y Bowman, M. J. (1999). The role and value of high-impact biostratigraphy in reservoir appraisal and development. Jones, R. W. y Simmons, M. D. (eds.). *Biostratigraphy in Production and Development Geology.* Geol. Society, Spec. Public. 152: 5-22.

Peters, K. E. y Moldowan, J. M. (1993). *The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. Prentice Hall, Nueva Jersey.

Pickering, K. T.; Hiscott, R. N. y Hein, F. J. (1989). *Deep Marine Environments. Clastic Sedimentation and Tectonics*. Unwin Hyman, Londres.

Posamentier, H. W.; Jervey, M. T. y Vail. P. R. (1988). Eustatic controls on clastic depositions I. Conceptual framework. In *Sea level Changes*. SEPM. Spec. Publ., 42: 109-124.

Rice, D. D. y Claypool, G. E. (1981). Generation, accumulation and resource of biogenic gas. *AAPG. Bull.* 65: 5-25.

Rider, M. H. (1986). *The Geological Interpretation of Well Logs*. John Wiley & Sons, Nueva York.

Sampson, A. (1988). *The seven sisters: The great oil companies and the world they shaped*. Rev. Coronet, Londres.

Schuchert, C. (1924). The value of microfossils in Petroleum Exploration. *AAPG. Bull.* 8 (5) 539-553.

Seifert, W. K. y Moldowan, J. M. (1978). Application of steranes, triterpanes and monoaromatics to maturation, migration and source of crude oils. *Geochimica et Cosmochimica acta* 42: 77-95.

Shipp, D. J. (1999). Well-site biostratigraphy of Danish horizontal wells. Jones, R. W. y Simmons, M. D. (eds.). *Biostratigraphy in Production and Development Geology*. Geol. Society, Spec. Publ., 152: 75-84.

Shwadran, B. (1973). *The Middle East, oil and the great powers*. John Wiley & Sons, Nueva York.

Skeet, I. (1988). *OPEC twenty-five years of prices and politics*. Universidad de Cambridge.

Sotomayor, J. E. y Vicente Bravo, J. C. (2002). Integration of logging while drilling images with wireline logging and thin sections improves reservoir characterisation in karstified reservoirs. 1^{er} Congreso Técnico Explo. Producción Repsolypf, Madrid, 333-364.

Stocks, A. E. y Lawrence, S. R. (1990). Identification of source rocks from wireline logs. *Geol. Society. Spec. Public.* 48: 241-252.

Stow, D. A. V. y Mayall, M. (2000). Deep-water sedimentary system: New model for the 21st century. *Marine. Petroleum Geology* 17: 125-135.

Suppe, J. (1985). *Principles of structural geology*. Prentice-Hall, Nueva Jersey.

Tissot, B. P. (1984). Recent avances in petroleum geochemistry applied to petroleum exploration. *AAPG. Bull.* 68: 545-563.

Tissot, B. P. y Welte, T. H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer Verlag, Berlín.

Turner, L. (1978). *Oil companies in the international system*. G. Allen and Unwin, Londres.

Vail, P. R. (1987). Seismic stratigraphy interpretation procedure. Bally, A. W. (ed.) *Atlas of Seismic Stratigraphy*. AAPG 27(11).

Vail, P. R.; Mitchum, R. H. Jr.; Todd, R. G.; Widmier, J. M.; Thomson, S.; Sangree, J. B.; Bubb, J. N. y Hatlelid, W. G. (1977). *Seismic stratigraphy and global change of sea level. Seismic stratigraphy, Application to Hydrocarbon Exploration*. AAPG. Mem. 26: 49-212.

Walker, R. G. (1978). Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps. *AAPG. Bull.* 62: 932-966.

Walker, R. G. (1984). *Facies model*. Geol. Ass. Canada.

Waples, D. (1980). Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration. *AAPG. Bull.* 64: 916-926.

Waples, D. (1985). *Geochemistry in Petroleum Exploration*. International Human Ressources Development Corporation, Boston.

Welte, D. H. y Yukler, M. A. (1981). Petroleum origin and accumulation in basin evolution -a quantitative model. *AAPG. Bull.* 65: 1387-1396.

Yergin, D. (1992). *La historia del petróleo: la lucha voraz por el dinero y el poder desde 1853 hasta la guerra del Golfo*. J. Vergara (ed.), Buenos Aires.

El geólogo y el medio ambiente

Manuel de Tena-Dávila

Consultor. Vocal de Medio Ambiente del ICOG.

A medida que el mundo se vuelve cada vez más interdependiente y frágil, el futuro depara a la vez grandes riesgos y grandes oportunidades. Para seguir adelante, debemos reconocer que en medio de la magnífica diversidad de culturas y formas de vida, somos una sola familia humana y una sola comunidad terrestre con un destino común. Debemos unirnos para crear una sociedad global sostenible fundada en el respeto hacia la naturaleza, los derechos humanos universales, la justicia económica y una cultura de paz. En torno a este fin, es imperativo que nosotros, los pueblos de la Tierra, declaremos nuestra responsabilidad unos hacia otros, hacia la gran comunidad de la vida y hacia las generaciones futuras.

Carta de la Tierra

Geología y medio ambiente

En 1972, la comunidad internacional se reunió en Estocolmo con motivo de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, para dar la voz de alarma sobre el estado crítico en el que se hallaba la Tierra y sus recursos.

Allí se definió el medio ambiente como “el conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos y sociales capaces de causar efectos directos e indirectos, en un plazo corto o largo, sobre los seres vivos y las actividades humanas”.

En 1987, el Informe Brundtland popularizó el concepto de desarrollo sostenible que se había acuñado en 1972, en el Manifiesto para la supervivencia, antes de la primera Cumbre de la Tierra de Estocolmo.

En 1992 se celebró en Río de Janeiro la siguiente Cumbre de la Tierra para debatir sobre “Medio Ambiente y Desarrollo”, como dos aspectos que se imbrican en el ser humano, con su cultura y forma de transformar el mundo.

La fragilidad del aire, agua y suelo nunca había sido cuestionada, hasta esos momentos, cuando la sociedad empezó a tomar conciencia de que la vida se desarrolla en estrecha relación con la naturaleza y que nuestros avances tecnológicos —medios de transporte, tipo de viviendas, desarrollo industrial, etc.—, diseñados y funcionando al margen de la naturaleza, inciden negativamente en el planeta y en los seres vivos, a corto, medio y largo plazo.

Esta preocupación por el medio ambiente ha ido generando preocupación creciente en los programas políticos, en los planes de formación escolar y universitaria e incluso en las empresas que descubren en los trabajos en pro del medio ambiente una dimensión de interés económica y de prestigio. De esta forma, el medio ambiente ha entrado, también, en el proceso de producción, generando posibilidades de inversión que proporciona beneficios y reconocimiento social.

Ante la pregunta de cuáles son los conocimientos necesarios para trabajar en este amplio concepto que llamamos medio ambiente y cuáles son las herramientas idóneas para su análisis, se observa que los conocimientos necesarios se aglutinan en un conjunto de disciplinas, amplias y dispares, una de las cuales —y fundamental— es la geología.

La geología es una de las disciplinas que interviene de forma habitual y con importancia diversa en la mayor parte de los estudios ambientales. Estudia la corteza terrestre en todos sus aspectos: su composición física y química, la historia de su formación, las modificaciones que sufre y las fuerzas que las causan, los fenómenos volcánicos y sísmicos, la naturaleza y origen de las rocas y minerales, el modelado de los terrenos, la génesis y ubicación de los recursos (agua, energéticos, minerales, etc.). La geología trabaja habitualmente con modelos prospectivos y, sobre todo, es una ciencia que, desde sus inicios, nació como consecuencia del interés de un conjunto de personas por respetar y conocer los secretos de la naturaleza.

La geología aplica los conocimientos de muchas otras ciencias, como la química, la física, la biología, la astronomía, la meteorología y la oceanografía. Al cubrir un campo tan extenso, está subdividida en diversas ramas o áreas de conocimiento especializadas: mineralogía, petrografía, paleontología, micropaleontología, geomorfología, hidrogeología, geología económica, yacimientos minerales y energéticos, geofísica, geología del subsuelo y geología marina. Para las nuevas generaciones de geólogos en el siglo XXI se ofertan especialidades en ingeniería geológica y geología ambiental.

Los geólogos son los profesionales que han adquirido los conocimientos, metodologías y herramientas de trabajo necesarias para la investigación, caracterización y búsqueda de soluciones ante los problemas ambientales relacionados con la Tierra, por lo que son profesionales que, en la dirección o colaborando con otros, participan habitualmente en la mayor parte de los estudios de medio ambiente.

Aportación de la geología al medio ambiente

En los estudios ambientales, el concepto de ecosistema se entiende como “el conjunto formado por los seres vivos (biocenosis), que habitan en un espacio (biotopo) y las interacciones que se establecen entre ellos”.

El biotopo es el substrato no vivo de un ecosistema, a diferencia de la biocenosis que es el conjunto de seres vivos de un ecosistema.

En el biotopo se engloba la geosfera que es el sistema constituido por atmósfera, hidrosfera y litosfera. La hidrosfera es la envoltura de agua de la superficie del planeta formada por océanos, mares, ríos, lagos y glaciares. La litosfera es el soporte de los demás sistemas de la Tierra, en el que se producen los procesos geológicos. Las aguas subterráneas forman parte de la litosfera.

El suelo y el litoral son dos interfases. El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre resultante de la interacción entre hidrosfera, atmósfera, geosfera y biosfera, que constituye el soporte para la vegetación a la que suministra agua y nutrientes; mientras que el litoral es la zona de contacto entre los continentes y océanos y tiene un elevado dinamismo.

En la mayor parte de los estudios ambientales es necesario hacer un análisis de los impactos directos e indirectos causados, a largo o corto plazo, por factores físicos, químicos, biológicos y sociales sobre los seres vivos y las actividades humanas.

Al trabajar en el conocimiento, análisis, protección y recuperación de la geosfera e hidrosfera se ponen en evidencia las aportaciones científicas y técnicas que se requieren de la geología en cualquier estudio medioambiental.

Para trabajar en la afección y protección de las costas, la calidad de las aguas, los cauces fluviales, en la recuperación de las áreas degradadas y de los suelos contaminados, la planificación del territorio, protección del patrimonio, etc., la geología es la ciencia adecuada y necesaria. Además, también vela por la explotación y gestión eficiente y sostenible de los recursos limitados, por la prospección y aprovechamiento racional de

los recursos no renovables y energías fósiles y por la localización y acondicionamiento para el almacenamiento de residuos en condiciones de favorabilidad ambiental.

Antecedentes de trabajos de geología aplicada al medio ambiente en España

Los primeros trabajos de geología que se hicieron en España los realizaron los licenciados en Ciencias Naturales. Es decir, los primeros geólogos en España fueron naturalistas y esto fue así hasta mediados de los años cincuenta del siglo XX.

La formación del geólogo lleva implícito el contacto, disfrute e integración de su actividad académica con la naturaleza, con la que está en estrecha relación en campamentos y salidas frecuentes al campo. En el desarrollo de su actividad profesional los trabajos de campo son siempre un referente para el geólogo, donde encuentra la máxima realización en el ejercicio de su profesión.

En España, la Empresa Nacional ADARO fue de las primeras que hizo trabajos relacionados con el medio ambiente; creó equipos de trabajo relacionados con la gestión de residuos, diseño y construcción de vertederos, etc.

En los años setenta del siglo XX, la Empresa Nacional ADARO acogió la idea del ingeniero Martín Cabaña de transformar las plantas de tratamiento mineralúrgico en plantas de tratamiento de RSU. Años después, en el Ayuntamiento de Madrid, se inauguraba la planta piloto "La Paloma" en Valdemingomez, que posteriormente explotaría los RSU de la ciudad. Paralelamente, ADARO veía crecer su departamento de Trabajos Medioambientales, inicialmente ligados a la gestión de los residuos y proyectos de vertederos, que estaba bajo la responsabilidad del geólogo Antonio Sánchez y en el que se integraban otros geólogos junto con otros profesionales.

Igualmente, entre los años ochenta y noventa se llevaron a cabo en España dos proyectos, de alcance estatal y relacionados con temas ambientales, en los que la contribución de los geólogos fue muy importante, por el número de ellos que participaron y por su responsabilidad profesional.

Uno fue el "Plan de Búsqueda de Emplazamientos Geológicos Profundos para el Almacenamiento de Residuos Radiactivos de Alta Actividad", promovido y dirigido por ENRESA. El proyecto supuso un exhaustivo estudio de algunas áreas en las que se conjugaba el conocimiento e investigación geológica con los principios ambientales acordes con la época, con objeto de seleccionar los emplazamientos más favorables para almacenar los residuos de alta actividad procedentes de las centrales nucleares.

El otro proyecto se llevó a cabo en los noventa y consistió en la realización de once hojas piloto para elaborar un “Plan de Cartografía Ambiental” escala 1/50.000 en España en el que se integraban en un GIS diversas capas de información ambiental, geológica, geomorfológica, litológica, botánica, suelos, agricultura, patrimonio, impacto visual, etc. Este proyecto, finalmente, no tuvo continuidad.

Ambos trabajos se realizaron bajo el principio de sostenibilidad, al tratar de preservar el medio ambiente y tener como filosofía de trabajo el no hipotecar a las generaciones futuras como consecuencia de los beneficios y ventajas que disfrutaban las generaciones actuales.

El desarrollo de ambos proyectos tuvo características que, además de significar un anticipo a los trabajos ambientales que inmediatamente se generalizarían en España, marcaron pautas y técnicas de trabajo, al impulsar y sistematizar la utilización de tecnologías que actualmente se aplican.

El Estatuto del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) aprobado por Real Decreto 1953/2000, de 1 de diciembre y modificado por Real Decreto 1134/2007, de 31 de agosto, define entre sus actividades el “estudiar el terreno continental, insular y el fondo marino en cuanto sea necesario para el conocimiento del medio geológico e hidrogeológico, en sus múltiples vertientes, tales como sus recursos, los procesos naturales, la vulnerabilidad de la actividad humana y sus implicaciones medioambientales...”; asimismo, la redacción de normativas ambientales y la promoción y establecimiento de técnicas relativas a la prevención, protección y restauración de terrenos y acuíferos.

Contribución de la geología en trabajos de medio ambiente

Las ciencias geológicas aportan el conocimiento científico y técnico necesario para acometer los trabajos en los distintos sistemas ambientales: litosfera, hidrosfera, suelo y litoral.

En los trabajos de la litosfera

En las explotaciones de recursos de energías fósiles

La explotación de los recursos de energías fósiles, petróleo y carbón causa fuertes impactos ambientales por las alteraciones y daños que generan en la morfología e hidrografía del ámbito en el que se ubican, por provocar la desaparición de suelo y de los ecosistemas en las zonas afectadas y por contribuir a su agotamiento. Además, son actividades con altos índices de riesgos laborales.

Las explotaciones de carbón pueden ser fuentes emisoras de ruido, polvo, gases y cenizas y, como consecuencia de su combustión, y dependiendo de su calidad, generalmente, emiten CO_2 , SO_2 , NO_x y trazas de metales.

Los geólogos trabajan en la búsqueda de reservas y recursos y en su explotación eficiente. Realizan un adecuado control y registro de los sondeos de investigación y de explotación, además de los trabajos en oficina, campo y laboratorio, donde participan sedimentólogos, estructuralistas, paleontólogos, geofísicos, etc.

En las explotaciones a cielo abierto o en interior trabajan asegurando la estabilidad de las cortas, hastiales y frentes de extracción; optimizando las explotaciones; haciendo el control geotécnico de la explotación y de las escombreras en pro de la seguridad, y trabajando por extraer las calidades de las capas que por sus constituyentes sean menos nocivas ambientalmente. (Ver el capítulo sobre el geólogo del petróleo.)

En la energía nuclear

En las minas de uranio se reconoce peligro de contaminación radiactiva durante la extracción, durante el enriquecimiento, transporte, fusión o almacenamiento de los residuos.

Las centrales nucleares —al igual que las térmicas— generan un incremento de la temperatura en los ecosistemas acuáticos a través de las aguas de refrigeración y los residuos radiactivos de alta actividad permanecen activos durante millones de años.

El emplazamiento de las centrales nucleares requiere de minuciosos estudios geológicos, hidrogeológicos, tectónicos, geomorfológicos, neotectónicos y de sismicidad previos a la selección de su emplazamiento, así como de impacto ambiental con vistas a obtener las autorizaciones oportunas.

El almacenamiento más seguro y estable para los residuos de alta actividad reconocido por la sociedad científica internacional es el emplazamiento geológico profundo que también requiere de detallados estudios geológicos, hidrogeológicos, sísmicos, tectónicos, geomorfológicos, neotectónicos y de geología prospectiva, entre otros.

En las instalaciones de energías renovables

En la explotación de los recursos renovables la aportación de la geología es necesaria para seleccionar el emplazamiento más idóneo de las instalaciones, en función de la seguridad, del menor coste y la máxima eficiencia en su explotación. Los estudios

estructurales, litológicos, morfológicos y de características geomecánicas de los materiales suelen ser la contribución más habitual de la geología en este tipo de trabajos, para que sean lo más respetuosos posibles con el medio ambiente. (Más adelante se detallan más específicamente los trabajos del ingeniero geólogo.)

- ▶ En las centrales hidroeléctricas. La explotación de la energía hidráulica requiere de estudios geológicos. Una central hidroeléctrica o una minicentral necesita acumular el agua en un embalse o presa, además de un desnivel. En la selección del vaso, en el proyecto y construcción del azud o de la presa, la conducción y el emplazamiento de la tubería de carga se requiere conocer las características morfológicas, geológicas, tectónicas, geotécnicas y sísmicas del emplazamiento de estas instalaciones, ya que su mayor o menor idoneidad influirá en la seguridad y coste de construcción y mantenimiento.
- ▶ En la energía eólica. Para la selección de emplazamientos y en la construcción de los grandes parques eólicos es necesario realizar estudios morfológicos, geotécnicos y de impacto visual.
- ▶ En la energía geotérmica. Relacionados con los géiseres o fuentes termales se pueden realizar aprovechamientos geotérmicos. Una vez que se encuentra un nivel permeable confinado en contacto con el foco anómalo de calor, se aprovecha esa agua o se inyecta agua que se recupera posteriormente por bombeo. Para llevar a cabo este tipo de aprovechamientos energéticos o turístico-medicinales (balnearios) se realizan estudios geológicos e hidrogeológicos detallados, apoyados con estudios geofísicos y de teledetección.

En la explotación de los recursos minerales y de rocas industriales

En las explotaciones mineras y de rocas industriales, a cielo abierto o subterráneas, hay que prestar atención a las afecciones ambientales que se causan a la atmósfera, suelo, agua, morfología, flora y fauna, etc.

- ▶ Afecciones a la atmósfera. En la zona de explotación y en sus cercanías, habitualmente se genera gran cantidad de polvo en las zonas de carga, en el acarreo de materiales, en el tráfico de la maquinaria pesada, durante la explotación por arranque o voladura, etc. Además la explotación suele ser fuente de altos niveles de ruido y el uso de los combustibles genera importantes emisiones de gases contaminantes.
- ▶ Afecciones al suelo. El suelo se ve afectado por su eliminación, sellado y compactación en las explotaciones mineras, lo que conlleva que se generen y aceleren los procesos erosivos. Además las operaciones de tratamiento suelen generar efluentes ácidos, orgánicos y con metales pesados que contaminan el suelo y las aguas.



Figura 1. Afecciones al suelo y a la morfología en la antigua explotación de bauxita en Las Mercedes, República Dominicana (foto cedida por Enrique Burkhalter).

- ▶ Impactos morfológicos. Las excavaciones, las acumulaciones de estériles, la creación de cortas, junto con la destrucción de la vegetación y la construcción de las infraestructuras necesarias modifican notablemente la morfología generando, si no se toman medidas, un fuerte impacto visual.
- ▶ Impactos biológicos y ecológicos. La explotación minera modifica el biotopo y también afecta a las especies vegetales y animales del área, lo que repercute en las cadenas tróficas y en la reducción de la diversidad.
- ▶ Riesgos laborales. Los trabajos mineros se consideran como de alto riesgo laboral.

La actuación del geólogo para mitigar o eliminar estas afecciones es importante durante las campañas de investigación y puesta en explotación de los recursos. A lo largo de la vida de la explotación y en función de las necesidades, participarán especialistas en yacimientos, estructuralistas, sedimentólogos, petrólogos, geofísicos, geotécnicos e hidrogeólogos que velarán por mitigar o eliminar los impactos ambientales de las explotaciones y trabajarán por hacer una explotación lo más eficiente posible. (En el presente libro consultar capítulo correspondiente en el que se refieren más ampliamente los trabajos del geólogo en relación con los recursos minerales.)



Figura 2. Las actividades mineras son de alto riesgo laboral y es misión del geólogo velar por la seguridad de los trabajadores.

En la búsqueda de almacenamientos para la captura del CO₂

El secuestro y el almacenamiento geológico de CO₂ constituyen técnicas actualmente en investigación dirigidas a ser una opción posible en la estrategia de mitigación de los efectos en el planeta de las emisiones de este gas a la atmósfera. Se abre con esta tecnología una nueva vía para alcanzar los objetivos medioambientales relativos al control de gases de efecto invernadero.

La investigación para la selección de los almacenamientos se centra en la localización de formaciones geológicas con capacidad potencial de almacenar CO₂, en especial yacimientos de hidrocarburos, cuencas de carbón y formaciones salinas profundas.

El CO₂ capturado, se somete a alta presión para licuarlo. Si una tonelada de CO₂ en condiciones normales ocupa 519 metros cúbicos, una vez licuado a más de 100 bares (la presión que se obtiene a unos 1.000 metros de profundidad en el agua) y 35° C, ocupa 1,3 metros cúbicos. El gas licuado se puede transportar e inyectar a través de conducciones.

La inyección podría realizarse en acuíferos inservibles para el uso humano o en formaciones impermeables, como minas de sal, capas de carbón o formaciones de pizarras. Una vez allí, el CO₂ se debe mantener aislado con opción a que vaya migrando

lentamente o reaccionando con los minerales del subsuelo. La profundidad del depósito debe ser superior a los 800 metros.

El coste es la clave de esta opción porque el sistema sólo será viable si resulta más rentable inyectar el CO₂ que comprar derechos de emisión, como prevé el Protocolo de Kioto.

Después de una selección preliminar de áreas geológicas favorables en las proximidades de las instalaciones emisoras del CO₂, es necesario realizar estudios tectónicos, estratigráficos, de geología del subsuelo, teledetección, de caracterización hidráulica, geofísica y de sismicidad, entre otros.

En la recuperación de áreas degradadas

Actualmente, es frecuente en el mundo occidental el cierre de instalaciones mineras antiguas por causa de los elevados costes de explotación, exigencias de seguridad, impactos ambientales y contestación social, principalmente. Esto ocasiona importantes bolsas de paro en comarcas o regiones geográficas que tradicionalmente han trabajado en el sector de la minería. Al unir esta situación con la necesaria seguridad de las instalaciones mineras que se abandonan y quedan desprotegidas, sin mantenimiento y generando un impacto negativo, es cada vez mas frecuente ponerlas en valor turístico. Para estas actuaciones es necesario hacer reconocimientos geológicos de la instalación minera, haciendo hincapié en la seguridad. Estudios estratigráficos, tectónicos, geotécnicos e hidrogeológicos resultan imprescindibles junto con la recopilación de los datos de la historia minera del emplazamiento.



Figura 3. La recuperación de áreas mineras degradadas y su puesta en valor turístico es una actividad en crecimiento. Monumento Natural de La Jayona. Antiguas minas de hierro en Fuente del Arco, Extremadura.

En los trabajos de la hidrosfera

Los recursos hídricos están constituidos por las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Su carácter de recurso imprescindible para la vida humana está condicionado por su distribución territorial, por las concentraciones de los asentamientos humanos, por el crecimiento exponencial, y a veces injustificado de su demanda, por los vertidos

que la contaminan y por la planificación de su gestión que, generalmente, la considera un recurso ilimitado. Esto explica que la sociedad sea muy sensible a su gestión y a su disponibilidad.

Los recursos hídricos requieren de una adecuada planificación de su gestión que fomente medidas de ahorro, racionalización del consumo y limitación de los vertidos potencialmente contaminantes. Estas medidas, junto con la puesta en servicio de nuevos recursos hídricos y la mejora en el aprovechamiento de los existentes son objetivos en los que están implicados los hidrogeólogos.

La investigación y delimitación de las cuencas hidrográficas, el estudio y control de la calidad de las aguas (Red SAICA), inventarios de los puntos de agua, control de las explotaciones superficiales y subterráneas, explotaciones para abastecimiento, para regadío o para usos industriales son trabajos que cuentan con la participación de gran número de hidrogeólogos y en los que el IGME ha sido un gran promotor e inversor.

Los trabajos de caracterización de las unidades acuíferas de baja permeabilidad, protección de cauces, regulación de las explotaciones de los acuíferos, integración de las plantas desalinizadoras en la gestión del agua, tratamiento de las aguas en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), participación en la redacción de los Planes Hidrológicos, Plan de Costas y Planes de Saneamiento y Depuración, etc., son otros de los trabajos en los que la dirección y participación de los hidrogeólogos es imprescindible.

Los humedales son subsistemas que tienen un importante valor ecológico. Las lagunas y humedales son el hábitat natural de numerosas especies animales y vegetales, constituyen un sistema de regulación natural del cauce de los ríos y suministran caudales de agua a manantiales, ríos y arroyos. Además, actúan como depuradoras naturales al absorber los fertilizantes, pesticidas y la materia orgánica vertida y son reguladoras del clima local.

Estas zonas han sufrido grandes agresiones ambientales al haberse utilizado como vertederos o haber sido desecadas en beneficio de cultivos o por sobreexplotación de los acuíferos. Desde 1900 se considera que la mitad de los humedales del mundo han sido destruidos a favor de la agricultura, industria o turismo y actualmente se están realizando en España numerosos trabajos de recuperación de los humedales —conforme al Convenio de Ramsar—, que están dirigidos por geólogos y en los que trabajan por su preservación y recuperación. (En este libro hay un capítulo en el que se explicitan más pormenorizadamente las tareas profesionales del hidrogeólogo.)

En los trabajos del suelo

El suelo es un recurso vital, y en gran parte no renovable, que está sometido a una presión cada vez mayor. La importancia de la protección de los suelos se reconoce tanto fuera como dentro de la UE.

El suelo se define en la Estrategia Temática para la Protección del Suelo (ETPS) al igual que en el R.D. 9/2005, como "la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos y que constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso".

La Unión Europea impulsó, en 2002, dentro de su sexto programa de Acción Comunitaria en materia de medio ambiente y durante el semestre de la presidencia española, la ETPS que tiene como objetivo el desarrollo de una política de conservación y uso sostenible del suelo y donde define las siete amenazas más notables que se identifican en Europa sobre el suelo: erosión, pérdida de materia orgánica, contaminación puntual y difusa, compactación, sellado, reducción de la biodiversidad y salinización. La erosión, la salinización y la contaminación puntual y difusa son las amenazas en las que la aportación del geólogo es más necesaria.

El IGME es el Centro Nacional de Referencia del Suelo dentro de la Red IONET.

En los trabajos para preservar la erosión

"La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación de 1994 tiene como objetivo evitar y reducir la degradación del suelo, rehabilitar terrenos parcialmente degradados y recuperar tierras desertizadas. La convención reconoce la relación que existe entre desertificación, pobreza, seguridad alimentaria, pérdida de biodiversidad y cambio climático."

En mayo de 2001, la Comisión advirtió que la erosión y el declive de la fertilidad del suelo representan una amenaza de primer orden para el desarrollo sostenible, ya que reducen la viabilidad de las tierras agrícolas¹.

La erosión es un fenómeno geológico causado por el desprendimiento de partículas del suelo a causa de la acción del agua o el viento, que las depositan en otro lugar. No

| 1. COM (2001) 264.

obstante, ciertas actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión. Por lo general, si la erosión es grave resulta irreversible.

En el proceso de erosión intervienen varios factores, tales como las pendientes pronunciadas, el clima, la inadecuada utilización del suelo, el tipo de cubierta vegetal y los desastres ecológicos. Además, ciertas características intrínsecas del suelo pueden hacerlo más propenso a la erosión, como el escaso desarrollo de los horizontes superiores, textura limosa o bajo contenido en materia orgánica.

España está catalogada como el país europeo con más riesgo de erosión, unos siete millones de hectáreas corren el riesgo de alcanzar la desertización y un millón de hectáreas tiene ya condiciones de desierto.

El geólogo, principalmente por medio de la geomorfología, aporta información básica para establecer las medidas oportunas de corrección del fenómeno erosivo, como el aterramiento y la reforestación. Por otra parte, es tarea específica del geólogo el realizar análisis prospectivos de tasas de erosión-sedimentación, con objeto de prevenir la colmatación de embalses o la acumulación de sedimentos en emplazamientos no deseados.

En los trabajos para prevenir y remediar la salinización

La salinización se produce por acumulación en los suelos de sales solubles, principalmente de sodio, magnesio y calcio, lo que provoca una importante reducción de su fertilidad.

En España, este proceso está asociado con el regadío, puesto que las aguas contienen sales en cantidades variables —en particular en las regiones de escasas precipitaciones—, con elevados niveles de evapotranspiración y cuando la textura de los suelos impide el lavado de las sales que se acumulan en las capas superficiales.

En las zonas costeras, la salinización puede estar vinculada a la sobreexplotación de las aguas subterráneas (debido a exigencias urbanísticas e industriales), que provoca un descenso del nivel freático y la intrusión de agua marina.

Se estima que en la UE, la salinización del suelo afecta a un millón de hectáreas, principalmente en los países mediterráneos. En España, concretamente un tres por ciento de los 3,5 millones de hectáreas de regadío se halla gravemente afectado por salinización, lo que se traduce en una importante reducción del potencial agrario, y otro 15 por ciento se encuentra seriamente amenazado².

² Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación (Borrador de Trabajo). Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, marzo, 2001.

Los geólogos trabajan en acciones predictivas y preventivas velando por la correcta gestión y explotación de las aguas subterráneas. En los casos de suelos ya salinizados, los estudios hidrogeológicos tienden a invertir el proceso generador de la salinización.

En los suelos contaminados

La contaminación de un suelo supone en sí misma una pérdida de un recurso natural, pero además los contaminantes pueden alcanzar determinados receptores produciendo efectos negativos en los mismos.

La contribución de la geología resulta imprescindible en la caracterización de los suelos contaminados, análisis de riesgos, remediación o recuperación de suelos contaminados, determinación de los niveles de fondo, de los niveles genéricos de referencia y en la realización de los inventarios de suelos contaminados.

En los trabajos de caracterización de un emplazamiento, las actividades a realizar se pueden resumir, muy sucintamente en:

- ▶ Estudio histórico de la actividad.
- ▶ Definición de las características relevantes del medio físico en que se ubica.
- ▶ Elaboración de un modelo conceptual de la actividad del emplazamiento, que incluirá una hipótesis de los posibles contaminantes presentes y su distribución espacial.
- ▶ Diseño de una campaña de campo y de la localización de las muestras a tomar y análisis a realizar.
- ▶ Visita al emplazamiento.
- ▶ Toma de muestras.
- ▶ Análisis de las muestras.

En los análisis de riesgo ambiental asociados a la contaminación potencial de los suelos se valora la concurrencia de tres factores:

- ▶ Concentración de contaminantes en el suelo.
- ▶ Exposición a la contaminación por diferentes vías.
- ▶ Toxicidad de las sustancias.

De este modo, se plantea la siguiente expresión:

Riesgo = Concentración x Exposición x Toxicidad

En los trabajos para determinar los Niveles de Fondo (NF) de un suelo será necesario:

- ▶ Recopilar la documentación cartográfica y bases de datos.
- ▶ Agrupar las formaciones geológicas manteniendo un equilibrio entre la homogeneidad litológica y petrológica.
- ▶ Realizar el Mapa de Unidades Litológicas Homogéneas que integre las áreas según su grado de pendiente, áreas protegidas, zonas industriales y urbanas.
- ▶ Diseñar la campaña de muestreo.
- ▶ Analizar de las muestras.
- ▶ Tratar los datos.
- ▶ Determinar los Niveles de Fondo.

En la determinación del Nivel Genérico de Referencia (NGR) de una sustancia, habrá que determinar la concentración máxima de esa sustancia en un suelo, de manera que suponga un riesgo admisible para la salud y el medio ambiente y para un determinado uso del suelo.

La Ley de Residuos fija la obligación para las comunidades autónomas de elaborar un inventario de suelos contaminados y establecer una relación de prioridades de actuación, según el riesgo que impliquen para la salud humana o el medio ambiente.

Además, será necesario responder a los indicadores ambientales que soliciten las instituciones europeas —en lo referente a la calidad y protección de los suelos—, por lo que será necesario disponer de información a nivel nacional de los suelos contaminados existentes.

En los distintos trabajos relacionados con los inventarios de suelos contaminados es fundamental la dirección y/o participación de los geólogos en la caracterización de los terrenos, el establecimiento de los modelos de comportamiento de los contaminantes, el análisis de la afección a las aguas superficiales y subterráneas, el diseño de las campañas de muestreo, la evaluación de las anomalías de las concentraciones, las campañas de sondeos y reconocimiento, la recuperación de suelos, etc.



Figura 4. Campaña de caracterización de suelos contaminados, Asturias.

En los trabajos del litoral

Costas. Geología marina, estudios de playas y del litoral

Al actuar la energía marina en el medio costero a través de las olas, las corrientes litorales y las mareas, se generan los procesos de erosión, transporte y deposición de materiales en el litoral que modelan las costas, cuyas formas más representativas son los acantilados y las plataformas de abrasión.

El oleaje genera corrientes litorales que movilizan y transportan los sedimentos en la costa. Además, todavía no son extrañas algunas actuaciones antrópicas que infringen desequilibrios que modifican la dinámica costera, como son:

- ▶ La reducción del aporte de los sedimentos de los cauces fluviales.
- ▶ Obras de regulación en los cauces, construcción de embalses, extracción de áridos y repoblaciones forestales.
- ▶ Modificaciones de la deriva litoral por la construcción de diques o espigones.
- ▶ Extracciones de arenas en las playas.
- ▶ Deforestaciones masivas que incrementan los aportes de sedimentos.
- ▶ Las edificaciones en las inmediaciones de la línea de costa, que perturban el régimen de vientos con las consiguientes modificaciones en los aportes a las playas y zonas litorales.

El incorporar profesionales de la geología en los proyectos y estudios que afecten al litoral es una forma de preservar las costas y evitar daños muchas veces irreversibles.



Figura 5. Pepillo Salcedo, República Dominicana.

En los trabajos de residuos

Vertederos

“Los expertos tenemos la responsabilidad ética de definir cómo se deben tratar los residuos de la manera óptima, y encontrar un consenso a nivel mundial sobre la sostenibilidad de los vertederos. No podemos dejarle esta tarea a la siguiente generación.” Luis F. Díaz, Universidad Berkeley de California.

La legislación europea y la española han introducido disposiciones para limitar los impactos ambientales a largo plazo de la gestión de vertederos, obligando a su control durante 30 años después de su clausura. Sin embargo, esto no garantiza en absoluto un impacto ambientalmente “aceptable” una vez transcurrido este periodo.

En el diseño de un vertedero hay que atender a un conjunto de aspectos puramente geológicos como son:

- ▶ Localización, geometría y características geológicas del emplazamiento o de los emplazamientos posibles.
- ▶ Estudio de la estabilidad de laderas y de los taludes en relación con la construcción y con la secuencias de llenado.
- ▶ Estimación del movimiento de tierras y búsqueda de emplazamientos para ubicar los materiales excedentes o de yacimientos para extraer los materiales necesarios para su sellado.
- ▶ Estudio geotécnico del emplazamiento.
- ▶ Caracterización hidrológica e hidrogeológica del emplazamiento.



Figura 6. Planta Integral de Gestión de Residuos de la Zoreda (Cogersa), Asturias.

En los trabajos de evaluación de riesgos

La década de los noventa fue declarada por la ONU-OMS decenio para la prevención de desastres naturales, ya que cada año el conjunto de catástrofes naturales afectaba aproximadamente al 0,1 por ciento de la población mundial.

En el estudio del riesgo ambiental intervienen cuatro variables, magnitud del fenómeno, frecuencia con que ocurre, duración y extensión del espacio afectado.

Dentro de los riesgos naturales, los riesgos geológicos son aquellos cuyo origen es la actividad interna y externa de la tierra, como los terremotos, volcanes, aludes, desprendimientos, coladas de lodo, inundaciones, etc.

Para mitigar el riesgo se diseñan y desarrollan medidas predictivas, preventivas y correctivas.

- ▶ Predicción consiste en anunciar con anticipación el lugar, momento, desarrollo, intensidad y las consecuencias de un riesgo geológico.
Es un trabajo específico del geólogo que interviene mediante la cartografía de riesgos, toma de datos, monitorización e identificación y detección de precursores indicadores.
- ▶ Prevención que consiste en establecer medidas y pautas que protejan con anticipación del fenómeno generador del riesgo, para mitigar los daños potenciales, mediante medidas estructurales (drenaje de laderas, reforestaciones, encauzamientos, corrección de los cauces, etc.) y otras medidas como planificación y ordenación del territorio, normativas específicas de construcción, planes de Protección Civil, campañas de sensibilización, educación y formación, contratación de seguros, etc.
- ▶ Corrección que consiste en la articulación y puesta en marcha de medidas con objeto de reducir el riesgo generado.

En el diseño y aplicación de las medidas de prevención y corrección, la aportación y participación del geólogo es imprescindible en el conocimiento del territorio, de sus riesgos asociados y de la idoneidad y aplicabilidad de las soluciones.

El IGME es el Centro Nacional de Referencia de Riesgos Naturales dentro de la Red IONET y los Servicios Geológicos de Brasil, Colombia y Cuba realizan importantes actividades de prevención y mitigación ante desastres naturales en sus respectivos países.

En los riesgos por inundación (riesgos de avenidas)

Las inundaciones y deslizamientos de tierras son fenómenos naturales estrechamente relacionados con la gestión de suelos y terrenos. Las inundaciones y los deslizamientos de tierras a gran escala pueden causar pérdidas humanas y graves daños y, generalmente, provocan fenómenos de erosión, contaminación y pérdida de recursos del suelo, lo que afecta además a la actividad humana, causa daños en edificios e infraestructuras y supone una pérdida de tierras de cultivo.

Este tipo de catástrofes naturales se producen con mayor frecuencia en zonas con suelos altamente erosionables, pendientes muy escarpadas e intensas precipitaciones y zonas en las que se han perdido los elementos de protección.

Los riesgos por inundación pueden deberse a diversas causas:

- ▶ Climáticas: por precipitaciones anómalas, deshielos o fusión anormalmente acelerada de la nieve o hielo de los glaciares.
- ▶ Geológicas: por las características litológicas de la cuenca, por condicionantes de la red hidrográfica o características de los cauces (ramblas).
- ▶ Inestabilidad de laderas: un deslizamiento puede llegar a producir un represamiento de las aguas.
- ▶ Acumulación de sedimentos: en el curso, desagües o desembocadura de los cauces fluviales.



Figura 7. Flujo de gravas tras la tormenta tropical Noel. República Dominicana (foto cedida por E. Burkhalter).

Los geólogos participan en la predicción, prevención y corrección de los riesgos de avenidas mediante la realización de mapas genéricos de riesgos o mapas más específicos de riesgos de avenidas y en la propuesta de soluciones y medidas de prevención y correctoras.

En los riesgos por sismicidad

Los principales efectos de los terremotos son los desplomes de edificios, daños en las vías de comunicación y servicios, deslizamientos de tierras por las sacudidas y desplazamientos superficiales del terreno. Los tsunamis están originados por los maremotos y son series de olas marinas que se desplazan a gran velocidad, alcanzando decenas de metros de altura.

Aunque no son indicadores fiables, los terremotos frecuentemente vienen precedidos de deformaciones en el suelo, modificaciones en los campos eléctricos y magnéticos y en el nivel de agua de los pozos, emisiones anómalas de radón a lo largo de las fracturas, etc.

Las medidas más eficaces ante el riesgo sísmico son la planificación y/o la identificación de las zonas de mayor riesgo y la aplicación de normas de prevención como:

- ▶ Identificar zonas sensibles, en las que se apliquen restricciones y/o condiciones de mayor seguridad en la construcción.
- ▶ Establecer redes de control y seguimiento.
- ▶ Habilitar normas de construcción que capaciten el que las edificaciones puedan soportar los movimientos sísmicos previsibles en la zona.
- ▶ Llevar a cabo campañas de educación y sensibilización en la población.

Los geólogos participan en la realización de informes y mapas de peligrosidad sísmica, zonación sismotectónica, determinación del riesgo sísmico, mapas de riesgo, etc., que se solicitan ante estudios y proyectos de ordenación del territorio, obras civiles, edificaciones singulares o sensibles, etc.

En los riesgos de erupciones volcánicas

La peligrosidad de los volcanes está relacionada con el contenido en gases y viscosidad del magma —lo que condiciona su explosividad— y por la presencia de aguas superficiales o subterráneas que puedan verse afectadas por la erupción. El material que se proyecta al aire en la erupción volcánica puede afectar a amplias zonas dificultando su visibilidad y llegando a sepultar grandes superficies. Además se pueden emitir gases nocivos para la salud en concentraciones elevadas.

Para la detección y prevención de los riesgos volcánicos el trabajo de los geólogos es fundamental en el diseño e implantación de las siguientes actuaciones en la zona volcánica:

- ▶ Control de la red microsísmica.
- ▶ Control de los sistemas de detección de deformaciones del terreno, inclinómetros, redes GPS o teledetección.
- ▶ Registro de modificaciones en el campo magnético, eléctrico y del flujo térmico.
- ▶ Redes de control gravimétrico.
- ▶ Control químico de los puntos de agua, fumarolas, manantiales, etc.

En los riesgos por deslizamientos

Los deslizamientos del terreno tienen riesgo para las personas, por los arrasamientos potenciales y por la inestabilidad de las masas de terreno desgajadas. El riesgo depende del tamaño de la masa deslizante y de su velocidad de deslizamiento.

Los deslizamientos se generan en zonas inestables que han sido activadas por factores desencadenantes como pueden ser las precipitaciones, vibraciones, descalces, actuaciones antrópicas, etc.



Figura 8. Deslizamiento en Carlos Díaz, región de Tamboril, República Dominicana, febrero de 2009 (foto cedida por Santiago Muñoz. SGN República Dominicana).



Figuras 9 y 10. Línea deslizamiento en Carlos Díaz, región de Tamboril, República Dominicana, febrero de 2009.



Figura 11. Daños en viviendas por movimientos del terreno. Deslizamiento en Carlos Díaz, región de Tamboril, República Dominicana, febrero de 2009 (foto cedida por Santiago Muñoz, SGN, República Dominicana).

El trabajo y decisión del geólogo es decisivo en la evaluación de la estabilidad de las laderas y en la determinación de las medidas correctoras que convenga aplicar. La valoración de taludes o laderas requiere de estudios morfológicos, estructurales,



Figura 12. Deslizamiento en Carlos Díaz, región de Tamboril, República Dominicana, febrero de 2009 (foto cedida por Santiago Muñoz, SGN, República Dominicana).

estratigráficos y litológicos e hidrogeológicos. Las medidas correctoras se especificarán para cada situación necesitándose reducir las cargas en las laderas, aplicar drenajes con objeto de abatir el nivel freático, aplicar bulones o mallas de protección, colocar escolleras al pie del talud o incluso reducir de su pendiente. Los criterios que dirigirán la solución más idónea serán los de la seguridad y los factores económicos.

En los riesgos por subsidencia

Los fenómenos de subsidencia no suelen generar pérdidas humanas pero sí pueden generar grandes pérdidas económicas. Su origen suele estar ligado a fenómenos tectónicos, movimientos sísmicos, colapso de rocas solubles, rellenos no bien compactados, hundimiento de zonas mineras, extracciones en el subsuelo.

La cartografía geológica y las técnicas geofísicas son las principales herramientas para detectar los fenómenos de subsidencia potenciales.

En los riesgos por suelos expansivos

Generalmente implican notable contenido en arcillas de los suelos que, al absorber agua, pueden llegar a modificar su volumen generando presiones laterales y abombamientos superficiales del suelo.

El geólogo, al identificar una formación con riesgo de expansividad, propondrá y diseñará las soluciones técnicas para evitar que la expansividad afecte a las cimentaciones de los edificios, mediante sistemas de drenaje de protección o aplicación de tratamientos del terreno.

En la medicina

La geología médica se define como la ciencia que trata sobre la relación entre los factores geológicos naturales y la salud del hombre y los animales, entendiendo la influencia de factores ambientales ordinarios en la potencial aparición de problemas de la salud.

Para interpretar el papel de rocas, suelos y agua subterránea en el control de la salud de humanos y animales se requiere la colaboración de geoquímicos, mineralogistas e investigadores médicos.

La geología médica es una disciplina emergente y una ciencia que crecerá rápidamente. Varios servicios geológicos están integrando en su trabajo la geología médica. Actualmente la geología médica se imparte en algunos cursos universitarios para los estudiantes médicos en Estados Unidos.

La geología médica se inició como una nueva disciplina en 1998 al crearse un grupo de trabajo especializado en ella dentro de Cogeoenvironment, una comisión internacional sobre geología ambiental que trabaja bajo los auspicios de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS).

En el paisaje

La primera definición de carácter científico que se encuentra en España de paisaje es del geólogo Eduardo Hernández Pacheco que, en 1934, lo definió como "la manifestación sintética de las condiciones y circunstancias geológicas y fisiográficas que concurren en un territorio".

En los componentes del paisaje hay factores geológicos fundamentales como la geomorfología y la litología. El geólogo está capacitado para identificar los indicadores

geológicos del paisaje, identificar sus elementos visuales, detectar los factores que alteran su visibilidad, delimitar la cuenca visual, calificar la calidad de un paisaje, establecer su fragilidad o vulnerabilidad y determinar las medidas correctoras para su recuperación.

En los Estudios de Impacto Ambiental

Los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) son mecanismos de evaluación de un proyecto a lo largo de sus fases, desde su definición hasta su clausura y desmantelamiento.

Se evalúa la incidencia en el medio ambiente que tienen las actuaciones del proyecto, analizándose distintas alternativas posibles y sometiendo el proyecto a un proceso de información pública.



Figura 13. Identificar y preservar la fragilidad del paisaje es una de las tareas del geólogo. Manglar de Arroyo Salado, La Colonia, República Dominicana (foto cedida por Enrique Burkhalter).

Un EIA tiene los siguientes objetivos:

- ▀ Identificar el medio potencialmente afectado por el proyecto y su vulnerabilidad.
- ▀ Predecir los efectos que se derivarán de la ejecución del proyecto en el medio ambiente.

- ▶ Prevenir la incidencia negativa que pudiera tener la ejecución del proyecto en el medio ambiente.

La participación del geólogo es necesaria en cualquier EIA para la identificación y evaluación de los impactos a la litosfera, hidrosfera y de los interfases suelo y litoral.

En la educación ambiental

El primer pronunciamiento explícito sobre la necesidad de educación ambiental en la sociedad se produjo en la Conferencia de Estocolmo (1972) y reclamaba la importancia de educar a las nuevas generaciones para que fueran conscientes de los problemas ambientales y adquirieran hábitos encaminados a proteger el planeta.

En la Conferencia Intergubernamental de Tbilisi (Georgia, 1977) se precisaron los objetivos y prioridades de la Educación Ambiental que se desarrollan en la actualidad. El "Programa 21" de la Cumbre de Río le dedica un capítulo y la considera imprescindible para modificar las actitudes de las personas para que conozcan los problemas del desarrollo sostenible y puedan abordarlos.



Figura 14. Geólogos trabajando en la protección del patrimonio natural. Geoda de Pulpí, Almería.

Los geólogos, desde sus puestos de enseñantes en las escuelas y universidades, contribuyen a difundir una conciencia ambiental entre sus alumnos, para que respeten la naturaleza, disfruten con ella y trabajen por el desarrollo sostenible de los pueblos del mundo.

También trabajan los geólogos en la protección del patrimonio natural para que las generaciones futuras puedan conocerlo, estudiarlo y disfrutarlo. Concretamente, desde los distintos puestos de responsabilidad en las comunidades autónomas, en organismos de la Administración central, desde el IGME y desde el ICOG los geólogos trabajan en la aplicación de los distintos instrumentos de protección del patrimonio mineralógico y paleontológico, para evitar la esquilmación de los yacimientos y en el reconocimiento de la "geodiversidad", como el conjunto de recursos geológicos de valor científico, cultural, educativo y/o recreativo a proteger.

El geólogo en el medio ambiente

El geólogo emplea sus conocimientos sobre la tierra para protegerla. Así, estudia el comportamiento de las aguas subterráneas y superficiales, identifica los recursos de aguas, energéticos, minerales y rocas industriales y participa en la predicción de los riesgos geológicos, los relacionados con las aguas, y en ofrecer soluciones para la gestión de los residuos.

Los geólogos ambientales desarrollan trabajos tendentes a diagnosticar y reducir o eliminar los agentes contaminantes o peligros que afectan a las personas, la fauna y el ecosistema. Los geólogos analizan, observan, evalúan y hacen determinaciones en agua y suelo y recomendaciones para conservarlos y mantenerlos más limpios, al descifrar las cuestiones complejas en la protección de su degradación y en su conservación. Mediante la utilización de sus técnicas y conocimientos diseñan y supervisan emplazamientos de vertido de basuras, aprovechamientos de agua y recuperan suelos y aguas contaminadas, de acuerdo con las normas y legislación ambiental de la Administración.

Los trabajos medioambientales requieren de actividades como la realización de planes y programas, estudios, caracterizaciones, diagnósticos, proyectos, análisis y/o identificación de impactos, evaluación de impactos, análisis de riesgos, diseño e implementación de las medidas correctoras y planes de control, seguimiento y clausura.

En los trabajos de medio ambiente, generalmente, el geólogo dirigirá o intervendrá en las fases de caracterización, recopilación de antecedentes, toma de datos, muestreos, análisis en laboratorio, interpretación de datos, evaluación de impactos o afecciones, medidas correctoras, análisis de riesgos, movilidad de los contaminantes, evaluación económica de soluciones, etc.

El Informe Dobris (El Medio Ambiente en Europa, 1998) enumera 56 problemas ambientales aceptados internacionalmente, de los que, los 26 siguientes, requieren la labor técnica del geólogo en su identificación, caracterización, evaluación y corrección: Nivel y calidad de las aguas subterráneas; Almacenamiento de residuos peligrosos; Eliminación de los residuos; Residuos nucleares; Conservación de la naturaleza y ecosistemas sensibles; Contaminación directa del mar por vertidos; Contaminación del suelo por vertidos; Contaminación del suelo y sus recursos; Eutrofización de las aguas, Aportes fluviales al mar; Cambios del régimen hidrológico; Gestión de los grandes ríos y lagos; Desertización; Escasez en el suministro de agua; Erosión del suelo; Vertidos de petróleo; Elevación del nivel del mar; Intensificación del uso de la tierra; Escasez de materias primas; Erosión litoral; Radiactividad natural; Radón; Desecación

de humedales; Inundaciones, sequías y tormentas; Alteración del paisaje; Pérdida del patrimonio cultural y actividad sísmica y volcanes.

En la tabla 1 se refieren los campos de competencia profesional de los geólogos más evidentes en los distintos ámbitos o especialidades dentro del medio ambiente.

Tabla 1

AGUAS	COSTAS	PROTECCIÓN DEL MEDIO NATURAL
Calidad de las aguas Protección y preservación de acuíferos Aprovechamiento de recursos hídricos Gestión del agua Estudios hidrogeológicos Estudios hidrológicos	Dinámica litoral Sedimentación litoral Deslindes litorales Recuperación de playas y drenajes de fondos marinos Afección antrópica en la zona de costa Emisarios submarinos	Declaración de Espacios Naturales Patrimonio geológico Protección paleontológica Puntos de interés geológico Geodiversidad
ATMÓSFERA	ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL	RIESGOS GEOLÓGICOS
Identificación de repositorios para almacenamiento de CO ₂	Geomorfología Litología Tectónica Hidrología Hidrogeología Suelos Paisaje	Inundaciones Deslizamientos Vulcanismo Sísmicidad Arcillas expansivas Subsistencia Carstificación
SUELOS	RECURSOS ENERGÉTICOS Y MINERALES	RESIDUOS
Estudios de suelos contaminados Caracterización Remediación Análisis de riesgos Determinación de niveles genéricos de referencia Erosión Salinización Prevención de colmatación de embalses	Petróleo Carbón Energía geotérmica. Balnearios Energía hidráulica Recuperación de áreas mineras degradadas	Diseño de vertederos Desgasificación de vertederos Localización e identificación de Reservorios para el almacenamiento de residuos radiactivos de baja, media y alta actividad

Para los trabajos del geólogo en estudios ambientales, en situaciones complejas o de alcances muy específicos se requerirá la intervención de geólogos especialistas como son los hidrogeólogos, geólogos especialistas en geología marina, en yacimientos o en geomorfología.

En la tabla 2 se presenta un cuadro en el que se reflejan los geólogos especialistas que habitualmente trabajan en los estudios relacionados con los distintos medios ambientales o actividades relacionadas con los trabajos de medio ambiente.

Tabla 2

ESPECIALIDAD	AGUAS	CAPTURA CO ₂	COSTAS	EIA	RECURSOS	RIESGOS	SUELOS
Geólogo	■	■	■	■	■	■	■
G. marina	■	■	■	■	■	■	■
Geofísicos	■	■	■	■	■	■	■
Geomorfólogo	■	■	■	■	■	■	■
Hidrogeólogo	■	■	■	■	■	■	■
Paleontólogo	■	■	■	■	■	■	■
Sismotectónico	■	■	■	■	■	■	■
Tectónico	■	■	■	■	■	■	■
Vulcanólogo	■	■	■	■	■	■	■
Yacimientos	■	■	■	■	■	■	■

■ Especialista recomendado para estudios de mayor complejidad
■ Si fuera necesario

Las herramientas geológicas que se utilizan en los trabajos de medio ambiente

Las herramientas de trabajo más habituales de los geólogos en los estudios ambientales son:

Sistema de Información Geográfica (GIS)

Instrumento tecnológico reciente y en expansión. Constituye una herramienta rápida y eficaz para su aplicación en los estudios ambientales. Supone una nueva filosofía que afecta a las condiciones en que los datos de la información deben generarse y tratarse para poder ser utilizados.

El GIS es un conjunto de programas de ordenador que permiten grabar, manipular, analizar y modelizar información referida al espacio, constituyendo su característica esencial el definir las relaciones "topológicas" entre una variable espacial y todo lo que la rodea. Estos sistemas contemplan el mundo real segmentado en "capas" de información homogénea (temática) que pueden superponerse en el espacio y el tiempo.

Sistema de Información Geográfica (GPS)

Es un sistema de posicionamiento en la superficie terrestre.

Teledetección

La teledetección es, igualmente, una tecnología de percepción remota de la realidad física mediante sensores situados en satélites capaces de escrutar los objetos terrestres en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

Esta tecnología está revolucionando los procedimientos de observación de nuestro planeta, a nivel global y local, aportando a los métodos convencionales una serie de ventajas:

- ▶ Una visión sintética, integrada y uniforme de la superficie terrestre.
- ▶ La repetición de la observación de un mismo lugar (actualmente cada media hora en satélites meteorológicos y cada 16 días en satélites de reconocimiento de recursos naturales).
- ▶ La calidad geométrica que, a través de tratamientos informáticos, permite actualizar cartografías topográficas y temáticas automáticamente.
- ▶ La enorme riqueza de información sobre un mismo objeto, al ser registrado su comportamiento en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético.

Los recursos naturales son objeto hoy de una interpretación económica sustancialmente distinta a la que pudieran tener años atrás. Si entonces preocupaban las influencias negativas de las actividades productivas y de consumo sobre los bienes ambientales, actualmente la atención internacional se centra, sin ignorar la cuestión de los impactos, en las consecuencias ecológicas de los posibles modelos de desarrollo aplicables.

Fotografías aéreas

Las fotografías aéreas, en pares estereoscópicos, son de utilidad para hacer un rastreo histórico de un emplazamiento a lo largo del tiempo. El primer vuelo fotogramétrico existente en España data de 1956 y posteriormente son numerosos los vuelos que se pueden conseguir en comunidades autónomas y en distintos organismos de la Administración central.

Mapas

Los mapas que, en estudios medioambientales, se consultan más frecuentemente son los topográficos, geológicos, geomorfológicos, de riesgos, hidrogeológicos, de calidad de las aguas, geofísicos, litorales, marinos, de rocas industriales, metalogenéticos, de vulnerabilidad, etc. Las escalas de los mapas consultados más frecuentemente varían entre la 1/25.000 y la 1/50.000.

Modelos

Existen modelos comerciales y diseñados por universidades aplicables a los estudios y análisis ambientales y de riesgos, del tipo de modelos analógicos, modelos matemáticos y modelos prospectivos que se seleccionan según el tipo de trabajo, alcance, disponibilidad de datos, etc.

Herramientas específicas

Los hidrogeólogos, geotécnicos, mineros y geofísicos utilizan herramientas específicas para sus trabajos de gabinete, campo y laboratorio, tal y como se describe en los capítulos correspondientes de esta publicación.

Profesionales con los que se relaciona

El número de profesionales que trabajan en medio ambiente en España no se conoce, si bien se puede decir que todo profesional está vinculado en unos u otros momentos con actividades relacionadas con el medio ambiente en su actividad profesional.

Los geólogos trabajan más habitualmente con:

- ▶ Los profesionales de la naturaleza: geólogos, biólogos, químicos, físicos, licenciados en Ciencias Ambientales.
- ▶ Los profesionales de las ciencias sociales y humanidades: geógrafos, abogados, historiadores, sociólogos, filósofos, políticos y, especialmente, los economistas.
- ▶ Matemáticos e informáticos: en los tratamientos estadísticos, diseño de modelos y en las aplicaciones informáticas.
- ▶ Ingenieros y arquitectos: dependiendo de la aplicación ambiental, se requiere, la participación de arquitectos, ingenieros industriales, agrónomos, de caminos, de montes, forestales, de minas.

Referencias bibliográficas

Álvarez Díaz, J.; Anegón Esteban, M^a C. et al. (1997). Medio Ambiente en España, Serie Memorias. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Madrid.

Astudillo, J. (2001). El Almacenamiento Geológico Profundo de los Residuos de Alta Actividad. ENRESA, Madrid.

Ayala Carcedo, F. J. (1988). Introducción a los Riesgos Geológicos. Riesgos Geológicos. IGME, Madrid.

Capote del Villar, R. (1988). Geología y Terremotos. Riesgos Geológicos. IGME, Madrid.

Carracedo Gómez, J. C. (1988). El Riesgo Volcánico. Riesgos Geológicos. IGME, Madrid.

Clarke, R. (2000). Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Informe del PNUMA, sobre el Medio Ambiente en el Milenio. Mundi Prensa, Madrid.

Echagüe Méndez de Vigo, G.; Fraguas Herrero, A. y Rodríguez Cuervo, C. (2002). El desarrollo sostenible: una visión histórica con el CONAMA de testigo. CONAMA 25-29 noviembre.

Ferrer Gijón, M. (1988). Deslizamientos y Desprendimientos, Flujos y Avalanchas. Riesgos Geológicos. IGME, Madrid.

Fundación Gómez Pardo (1998). Jornadas sobre Suelos Contaminados. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad Ambiental. Fundación Gómez Pardo. Ed. Terceras, Madrid.

Herzog, H.; Eliasson, B. y Kaarstad, O. (2000). Confinamiento de los Gases Invernadero. Investigación y Ciencia 238.

IGME (1996). Suelos Contaminados. Jornadas nacionales en Suelos Contaminados. Madrid.

IGME (2003). Operatividad de la Instrumentación en Aguas Subterráneas, Suelos Contaminados y Riesgos Geológicos. Ministerio de Ciencia y Tecnología.

ITGE y EPM (1989). Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid.

López Vera, F. (1991). Contaminación de las Aguas Subterráneas. Unidades Temáticas Ambientales. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Secretaría General de Medio Ambiente, Madrid.

Miguel, E. de; Callaba, A.; Arranz, J. C.; Cala, V.; Chacón, E.; Gallego, E.; Alberruche, E.; Alonso, C.; Fernández-Cantelí, P.; Iribarren, I. y Palacios, H. (2002). Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de Metales Pesados y Otros elementos traza en Suelos de la Comunidad de Madrid. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.

Rebollo, L. F. y Arenas, M. (1993). Contaminación de las Aguas Subterráneas. Ecosistemas.

Sobрино, J. A. (2000). Teledetección. Universitat de Valencia.

Stanneers, D. y Bourdeau, P. (1998). Medio Ambiente en Europa. El Informe Dobris. Edición española de Francisco Lopez. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

WAA (1998). Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Río 92. Programa 21. Secretaría General Técnica.

Recursos en la web

www.onu.org/sc/descubriendo/ambi.htm

www.juntadeandalucia.es/medioambiente/red_ambiental/evaluacion.html

www.leics.gov.uk/index/community/community_services/environment_and_heritage/historic_natural_environment_team/historic_natural_environment_geology.htm

www.medicalgeology.org/

www.icog.es/_portal/colegio/que_es.asp

www.aesa.msc.es/aesa/web/AESA.jsp

www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Teledeteccion/corine/clc/

www.mma.es/

www.tecnociencia.es/especiales/residuos/14b.htm

www.idae.es/index.asp?i=es

62.37.229.104/fbiodiversidadweb/webdinamica/inicio.do

www.ihobe.net/pags/AP/Ap_Buscador/index.asp?cod=1|C|2|395|395|448

ims.eionet.europa.eu/

www.tecnologiambiental.com/noticias/ListadoNoticias.php

www.eugris.info/

www.arc-cat.net/es/municipals/installacions/diposit/tipus.html

eusoiils.jrc.it/esdb_archive/EuDASM/indexes/access.htm

waste.ideal.es/Indice.html

www.epa.gov/iris/

www.rediris.es/list/info/patrigeo.es.html

Agradecimientos

Mi agradecimiento por la lectura del original, sus comentarios y por sus aportaciones a:

M. F. Valverde, J. Suso. A. Sánchez, M. E. Sarmentero, J. P. Pérez. y J. L. Barrera.

El geólogo cartógrafo

Roberto Rodríguez Fernández

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

con la colaboración de Fabián López Olmedo, Ángel Martín Serrano, Jerónimo Matas, Luis Miguel Martín Parra, Manuel Montes y Francisco Nozal del IGME

¿Qué es la cartografía geológica?

La cartografía geológica es la disciplina que, empleando diversas técnicas, expresa mediante una representación gráfica la información geológica referida a un sector de la corteza terrestre. El producto resultante es el mapa geológico, que es la representación sobre un plano, de la naturaleza, distribución espacial y relaciones geométricas de los materiales que afloran en la superficie terrestre, observables tanto directa como indirectamente y representables, a una escala determinada, sobre una base topográfica o cualquier otro soporte de información geográfica.

En el mapa geológico la distribución espacial de las unidades representadas, así como la naturaleza de sus contactos y su disposición geométrica, permite deducir las relaciones de "parentesco" entre las rocas o unidades diferenciadas, reconstruir cómo se formaron y visualizar su disposición tridimensional bajo tierra.

Un mapa geológico puede ser la primera introducción en el conocimiento para un geólogo que está reconociendo una zona, y puede también representar la culminación de sus investigaciones en un área. Es por tanto un mecanismo de comunicación geológica que sintetiza el conocimiento existente de un área determinada. El mapa es el resultado final del trabajo geológico, y siempre tiene un componente de observación y otro de interpretación; el segundo será tanto más exacto cuanto más preciso sea el primero.

Los objetivos finales de la cartografía geológica incluyen un análisis y expresión de los conocimientos de un sector de la corteza terrestre, ligar estos resultados a un sistema geográfico de referencia y establecer un código de lectura para que el mapa geológico sea un banco de datos para futuros usos. Todo esto implica que el mapa tiene que estar dotado de una leyenda de símbolos y datos gráficos para interpretar la geología, distinta de la leyenda para la base topográfica.

Generalmente el mapa geológico presenta dos lecturas: una que, transmite la información básica contenida en el mapa; otra, que extrae la información, no directamente visible, por medio de cálculos gráficos o numéricos, aplicando diversas técnicas.

Breve historia de la cartografía geológica

La historia de la cartografía geológica nace con la propia Geología como disciplina científica. Los primeros mapas geológicos surgen en la segunda mitad del siglo XVIII, si bien su desarrollo no se generaliza hasta el segundo tercio del siglo XIX, cuando empiezan a crearse los primeros institutos geológicos en Europa, entre ellos, el actual Instituto Geológico y Minero de España, creado en 1849.

El primer mapa geológico propiamente dicho se realizó en la parte oriental del condado de Kent, en Inglaterra (Packer, 1743) y fue denominado por el autor *A new philosophical chart of East Kent*. Casi simultáneamente (1746), Jean-Etienne Guettard presenta en la Academia de Ciencias de París un mapa, que acompañaba un trabajo sobre la distribución de minerales y rocas en el reino de Francia. Ambos mapas, aunque realizados con objetivos geológicos, ignoran la existencia de estratos así como el concepto de superposición de los mismos.

Hay que esperar medio siglo para que aparezca un mapa geológico con rasgos modernos, en el que ya se tiene en cuenta el principio de la sucesión faunística y de la superposición de estratos. Se trata del Mapa geológico de Bath, realizado en 1799 por el inglés William Smith (1769-1839), que alcanzó a comprender que los estratos se disponían conforme a determinadas pautas y que se podían encontrar siempre en la misma posición relativa. Y no sólo eso, sino que también su contenido fósil podía incluso identificarlos y caracterizarlos. Este brillante descubrimiento dota a Smith de una innovadora herramienta cartográfica que lo convierte en el padre de la geología inglesa y le permite publicar, en 1815, el primer mapa geológico de Inglaterra (Winchester). Casi al mismo tiempo, en 1811, el paleontólogo Cuvier (1769-1832) y el mineralogista Brongniart (1770-1847), llegan a parecidas conclusiones en el Mapa geológico de los alrededores de París.

La cartografía geológica se inicia en España de la mano de Guillermo Schulz (1805-1877), autor del primer mapa geológico realizado en España, en 1834: el Mapa Petrográfico del Reino de Galicia, a escala 1:400.000. El mapa se publicó un año más tarde, elaborado en el marco de un estudio general: la Descripción Geognóstica del Reino de Galicia. Diez años después, otro pionero de la geología, Ezquerro del Bayo (1793-1859), publica el que podría considerarse el segundo mapa geológico: el Croquis Geognóstico de la Cuenca del Duero, a escala aproximada 1:1.000.000. Este mismo autor, en 1850, publica en Stuttgart la primera cartografía de todo el territorio nacional (Bosquejo Geognóstico de España) a escala aproximada de 1:5.000.000.



Figura 1. Primer mapa geológico de España.

A partir de esa fecha, con la creación, por Real Decreto de 12 de Julio de 1849, de la Comisión para la Carta Geológica de Madrid y General del Reino, cambia muy favorablemente el escenario donde se va a desarrollar la cartografía geológica española. Esta iniciativa, que tiene como finalidad primordial del recién fundado instituto la elaboración de la cartografía geológica de todo el país, se apoya —según cita el Real Decreto de su creación—, “en la utilidad de las ciencias de la Tierra para el desarrollo y bienestar de los pueblos y los beneficios y aplicaciones que su conocimiento tenía en sectores tan variados como la minería, las obras públicas, la agricultura, el abastecimiento de agua a los núcleos de población, así como en la construcción y edificación”. Se trata de un hecho de una lucidez sorprendente para la Administración de la época, pues tales afirmaciones, sobre el valor social de la cartografía geológica, aún hoy son poco reconocidas y mal comprendidas.

1ª Serie del Mapa Geológico de España

El mapa geológico de España elaborado de forma sistemática, se comienza a abordar desde los primeros momentos de actividad de la Comisión. En 1850 cambia su denominación por la de "Comisión del Mapa Geológico de España" y, en 1852, aparece publicada su primera obra: el Mapa Geológico de la Provincia de Madrid. La publicación, en 1889, del primer conjunto mural del Mapa Geológico de la España peninsular a escala 1:400.000 y los siete tomos de la Explicación del Mapa Geológico de España, en 1895, constituyen, sin lugar a dudas, el primer hito importante en la elaboración del mapa geológico de España de una forma sistemática.

A pesar de que ya en 1866 se había programado la realización sistemática de una serie de mapas geológicos a escala 1:50.000, no es hasta 1910 cuando el ya denominado Instituto Geológico de España —Instituto Geológico y Minero de España, a partir de 1927—, se va a encargar de la elaboración del mencionado plan sistemático de cartografía geológica: la 1ª Serie del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. En el año 1928, se publica la hoja de Alcalá de Henares que, junto con otras cuatro más publicadas ese mismo año, constituyen las primeras hojas del nuevo Mapa Geológico de España a escala 1:50.000.

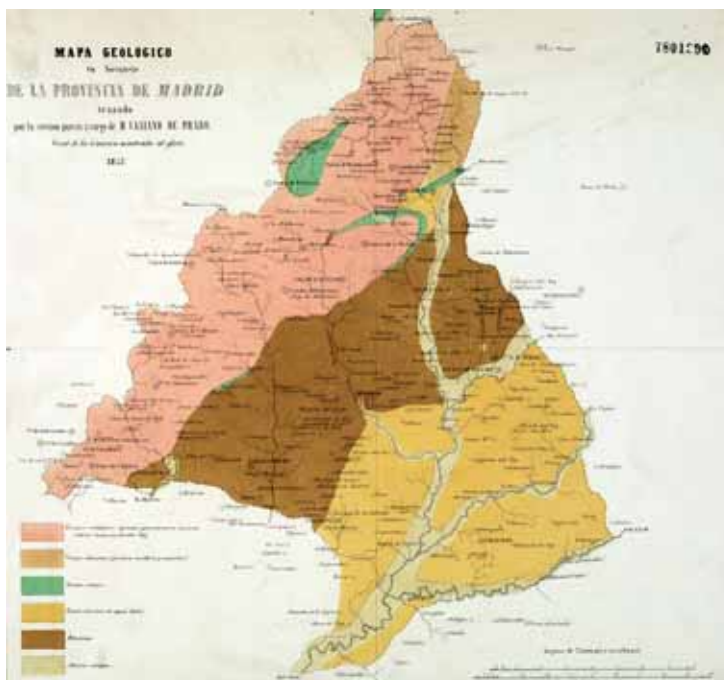


Figura 2. Mapa Geológico de la Provincia de Madrid.

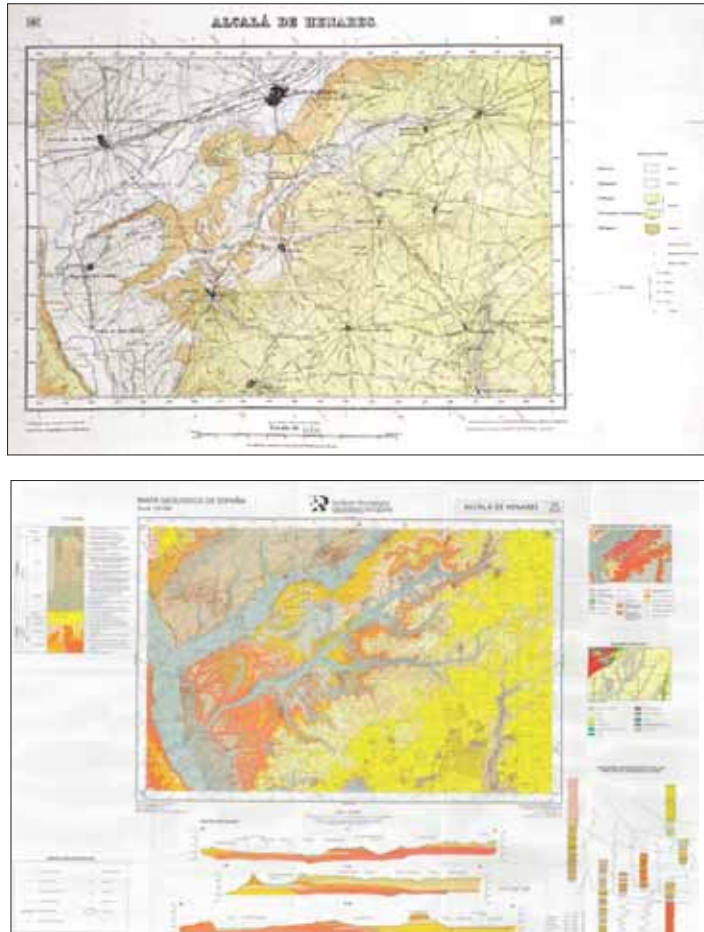


Figura 3. Arriba, Hoja de Alcalá de Henares de la 1ª Serie del Mapa Geológico de España; abajo, la misma hoja de la 2ª Serie (MAGNA).

Esta serie pervivió a todos los avatares políticos de la primera mitad del siglo XX y, a finales de la década de los sesenta, había llegado a elaborar un 40 por ciento de las 1.180 hojas posibles. En 1971, al imprimirse la última hoja de esta 1ª Serie, se habían publicado un total de 442 hojas.

El Plan MAGNA

El Proyecto del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, 2ª Serie (MAGNA), constituye, sin duda, el mapa geológico más emblemático de cuantos se han realizado en España. Durante los años 1970 y 1971, el IGME proyecta un nuevo plan de cartografía geológica, cuyo objetivo era dotar al país de una infraestructura geológica de calidad homogénea, elaborada con las metodologías más actuales en cada momento, y expresada en

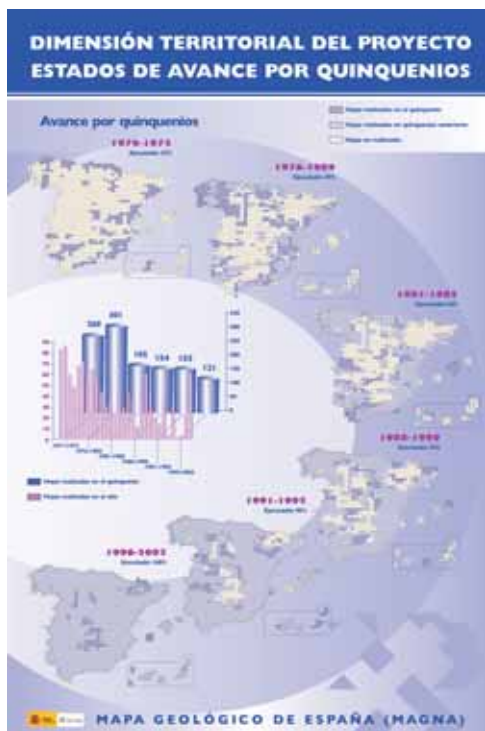


Figura 4. Avance del Plan MAGNA.

un formato y con unas normativas también homogéneas: el denominado Plan MAGNA.

En la evaluación y valoración económica del MAGNA se utilizaron criterios novedosos y homogéneos, teniendo en cuenta parámetros como la dificultad geológica, la accesibilidad, la climatología, etc. La programación se realizó de acuerdo con las prioridades de los sectores necesitados de esta moderna infraestructura geológica que, como se anticipaba en el Real Decreto de creación del Instituto, seguían siendo la minería, las obras públicas, la agricultura, la planificación económica y del territorio, etc... Para ello se realizó una encuesta en la que se consultaron 84 organismos e instituciones públicas y 45 empresas o entidades del sector privado.

Durante los 30 años de ejecución del Plan MAGNA, han participado en su realización más de 600 geólogos cartógrafos y unos 450 especialistas diversos, pertenecientes a más de 20 empresas de ingeniería o consultoría, 9 facultades de Ciencias Geológicas, 2 escuelas superiores de ingenieros de minas, 2 servicios geológicos regionales, además del personal del propio Instituto Geológico y Minero de España.

El valor de la inversión total ha sido de 127 millones de euros aproximadamente. La realización de cada hoja geológica de dificultad media ha exigido la dedicación equivalente a 1,8 geólogos/año, computando trabajo de campo, laboratorio y apoyo de expertos en las diferentes disciplinas geológicas, de forma que el coste unitario de una hoja ha sido de unos 100.000 euros.

¿Para qué sirven los mapas geológicos? Valor económico y social de la cartografía geológica

A nivel internacional han existido algunos intentos de evaluar económicamente los programas de cartografía geológica. En Estados Unidos, la bibliografía inicial publicada por el Servicio Geológico (USGS) está siempre ligada a casos reales y soportada por

cálculos empíricos específicos, no pudiendo extraerse valoraciones globales. De todos estos estudios, los de mayor repercusión internacional han sido los de Bernknopf et al. (1997, 1998, 2001), donde se calculan los beneficios de una cartografía geológica de mayor escala que la preexistente mediante la estimación de los ahorros generados en la localización de vertederos o en el diseño de carreteras, con un ratio beneficio/coste de la nueva cartografía de mayor detalle comprendido entre 2,11 y 4,03. En España, el Programa Nacional de Investigación Minera (PNIM) de 1972, en el que estaba incluido el Plan MAGNA, contabilizó sus posibles beneficios brutos en el equivalente de 277,89 millones de euros de 2003, que, una vez deducidas las inversiones necesarias, se transformaron en unos beneficios netos de 193,83 millones de euros, con un ratio beneficio/coste de 3,3. Consideraba únicamente los beneficios generados por la utilización de la cartografía geológica en los sectores de las aguas subterráneas, investigación minera, obras públicas y agrícola.

En el año 2000, el USGS realizó el estudio Beneficios económicos de los mapas geológicos detallados de Kentucky donde perfeccionó la metodología de encuesta a usuarios, esta vez para determinar el valor de la cartografía geológica detallada en este estado y considerando una gran variedad de potenciales usuarios. El rango del ratio beneficio/coste que este estudio arroja para el programa de cartografía geológica 1:24.000 de Kentucky es de 24,99 a 39,16. Esta metodología ha servido de base para la evaluación económica y social del Plan MAGNA, una vez adaptada a la realidad española, única iniciativa española para evaluar el beneficio social de la cartografía geológica.

Para realizar la evaluación se hizo una encuesta a un total de unos 1.200 usuarios actuales o potenciales de mapas geológicos. El ratio de respuestas obtenido, aproximadamente un 26 por ciento (311 cuestionarios recibidos), se considera que aporta una muestra suficientemente representativa de los usuarios de las hojas MAGNA. Entre los distintos expertos encuestados se encuentran principalmente técnicos activos en los sectores de ingeniería, universidades y minería e hidrocarburos además de la administración pública, el medio ambiente, la construcción y la agricultura. Se solicitó de los distintos usuarios la contestación a un cuestionario diseñado con el objeto de obtener informaciones y datos sobre la utilización de las hojas MAGNA, posibles informaciones adicionales de interés a incluir en futuros programas y una evaluación subjetiva de su valor económico. El análisis de las respuestas recibidas permite deducir que los usuarios demandan mantener los formatos papel y digital, este último con ciertas funcionalidades de análisis y con toda la información complementaria de las hojas, una mayor cobertura del territorio con cartografía geomorfológica (sólo el 20 por ciento del MAGNA dispone de este tipo de cobertura), y mejorar el tratamiento de la geología del subsuelo.

En cuanto a la evaluación económica, los beneficios en euros del Plan MAGNA, entendidos como el ahorro que la utilización de las hojas ha generado en los usuarios, se han

evaluado en 2.200 millones, aproximadamente, con un valor mínimo de 1.255 millones y un valor máximo de 3.340 millones, lo que permite afirmar que el ratio beneficio/coste del Plan MAGNA es de 18, con una horquilla comprendida entre 10,35 y 27,54. Este cálculo está sometido, obviamente, a las incertidumbres propias del resultado de la encuesta. También hay que considerar que se ha simplificado la evaluación asumiendo que la valoración de las hojas realizadas por los usuarios en 2003 es extrapolable al resto de ejercicios. A pesar de todo, el resultado es, sin duda, conservador ya que, en dos aspectos importantes, se han adoptado decisiones "a la baja" como la estimación del número de hojas vendidas y la asunción de que cada ejemplar adquirido por el usuario se utiliza en un solo proyecto.

Puede concluirse, por tanto, que el Plan MAGNA, con un ratio beneficio/coste de 18 ha sido una excelente inversión pública, superando con creces las expectativas contempladas en los informes de evaluación económica iniciales que estimaban ratios considerablemente menores. Se pone de manifiesto con todos estos datos la envergadura del Proyecto MAGNA en sus contenidos, y el esfuerzo técnico y económico que ha sido necesario para su realización.

El trabajo del geólogo cartógrafo: tipos de mapas que realiza el geólogo

Actualmente el geólogo cartógrafo, aunque desarrolla un trabajo en cierto modo similar al que se ha hecho desde el siglo XIX, debe utilizar el conocimiento y los avances técnicos actuales para expresar en un mapa el tipo de rocas, su génesis, las relaciones entre ellas y los procesos que han sufrido de la forma más rigurosa, con el fin de que la cartografía geológica sea lo más útil posible y mantenga su validez con el transcurso de los años.

El geólogo cartógrafo debe conocer el estado actual del conocimiento en las geociencias, en general, y estar especializado en las disciplinas de la geología relacionadas con los objetivos del tipo de mapa geológico a realizar, o de la naturaleza de los materiales a cartografiar, en particular: mapas geológicos en áreas de basamento o de cobertera, mapas geomorfológicos, etc. Es conveniente, además, que conozca las posibilidades y limitaciones de los avances realizados en las técnicas auxiliares, como los nuevos métodos de adquisición de datos a través de satélites, la geoquímica, la geofísica y la geocronología, sin olvidar las técnicas de representación para exponer el producto final, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), o la posibilidad actual de realizar modelos en 3D. La administración de la información obtenida en formato digital, el escalado de la misma y la posibilidad de volcarla en la red para acceder a ella en tiempo real, abre unas posibilidades muy lejanas de las que nuestros científicos hace un siglo soñaban.

Naturalmente, el geólogo en el campo no dispone de toda esa infraestructura para realizar la primera tarea, que es la adquisición de los datos. La geología actual requiere la colaboración de equipos multidisciplinares, pero sí entra en su competencia captar correctamente los datos y determinar las técnicas auxiliares y los equipos de trabajo idóneos para realizar la cartografía correcta en un determinado marco geológico.

Para realizar un mapa geológico, en primer lugar se hace una amplia revisión de información geológica existente, se analizan las fotografías aéreas y las imágenes de satélite, sobre las que se hace una primera interpretación (fotogeología). A partir de ahí, se planifica y realiza el trabajo de campo, haciendo recorridos para adquirir datos de utilidad cartográfica (contactos, buzamientos...), solucionar problemas cartográficos y hacer interpretaciones geológicas in situ en los afloramientos rocosos. Se simultanea esta actividad con la toma de muestras para el estudio de su petrología, analizando láminas delgadas —de 0,3 mm de espesor— de la roca, realizando análisis químicos o estudiando su contenido fosilífero.

En la actualidad, el geólogo puede realizar los mapas geológicos de forma individual, o integrado en un equipo multidisciplinar de trabajo, formado por distintos especialistas de la geología. Cuanto más complejo y variado es el mapa a realizar, es más aconsejable la participación de diferentes especialistas para asegurar la calidad del mismo.



Figura 5. Imagen de satélite utilizada para hacer mapas geológicos.

Tipos de mapas que el geólogo realiza

El mapa por excelencia que realiza un geólogo cartógrafo es el mapa geológico, en el que se representan una serie de unidades litoestratigráficas, que son agrupaciones de rocas con litología y edad común, definida bien por su contenido paleontológico, por técnicas geocronológicas o por criterios sedimentarios. Además de estas unidades —formadas normalmente por estratos y que son denominadas formaciones, grupos o miembros—, se representan otros materiales no estratificados como son todo el conjunto de rocas ígneas, plutónicas, volcánicas y subvolcánicas.

La información geológica referente a edades y litologías de las rocas se representa mediante diferentes recintos de colores y/o tramas, por lo que un mapa geológico siempre debe contener una leyenda que permita interpretar toda la información reflejada en el mismo. Las relaciones estructurales entre las distintas unidades se representan mediante un tipo de símbolos característicos, lo que otorga al mapa un carácter tridimensional. Acompañan pues a la leyenda, una librería de símbolos que sirve de complemento a la misma.

Toda esta información se completa con uno o varios cortes geológicos, en los que se expresa gráficamente la disposición geométrica en profundidad de las unidades que aparecen en el mapa geológico.

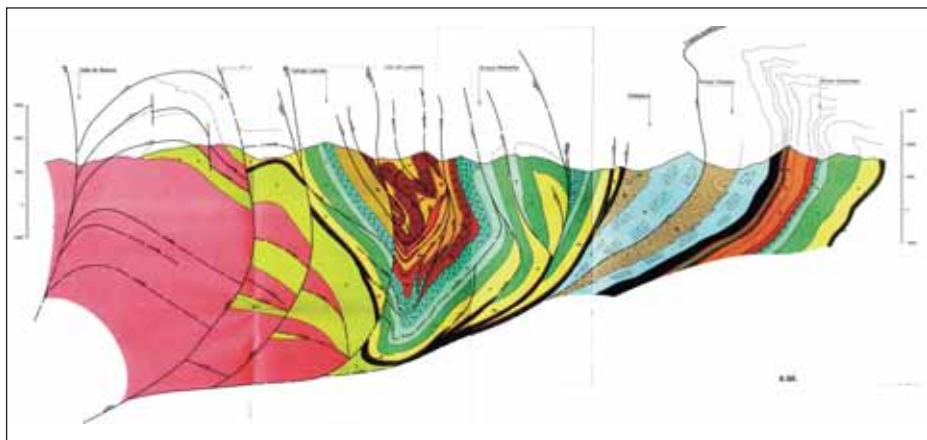


Figura 6. Corte geológico.

Los mapas se han editado generalmente en soporte de papel, que es el documento más fácilmente manejable para el usuario en campo. Sin embargo, actualmente es cada vez más frecuente la edición en soporte digital. Normalmente, los mapas geológicos van acompañados de una memoria explicativa, y suelen ser editados por los servicios o

institutos geológicos de los diferentes países, o bien por instituciones equivalentes de regiones, estados federados o comunidades autónomas.

Las escalas de representación de los mapas son diferentes según la finalidad de los mismos. Normalmente, se habla de mapas a gran escala o de mapas a mediana o pequeña escala. Los primeros comprenden mapas editados a escalas comprendidas entre 1:10.000 y 1:50.000 (más raramente a 1:1.000 a 1:5.000), los de media escala son mapas editados desde 1:100.000 hasta 1:500.000, y se reserva la denominación de pequeña escala para mapas editados a escalas comprendidas entre 1:1.000.000 a 1:5.000.000. Las escalas 1:25.000 y 1:50.000 son las más frecuentemente utilizadas para la elaboración de mapas geológicos. La escala 1:200.000 es utilizada para trabajos de carácter regional o como infraestructura básica en temas relacionados con la minería y/o la hidrogeología. Los mapas geológicos a pequeña escala suelen ser mapas geológicos murales de países, como el Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias, a escala 1:1.000.000 —editado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) varias veces desde el siglo XIX—. Por el contrario, las escalas detalladas, se prestan más para la edición de mapas aplicados en el campo de la minería o la geotecnia.

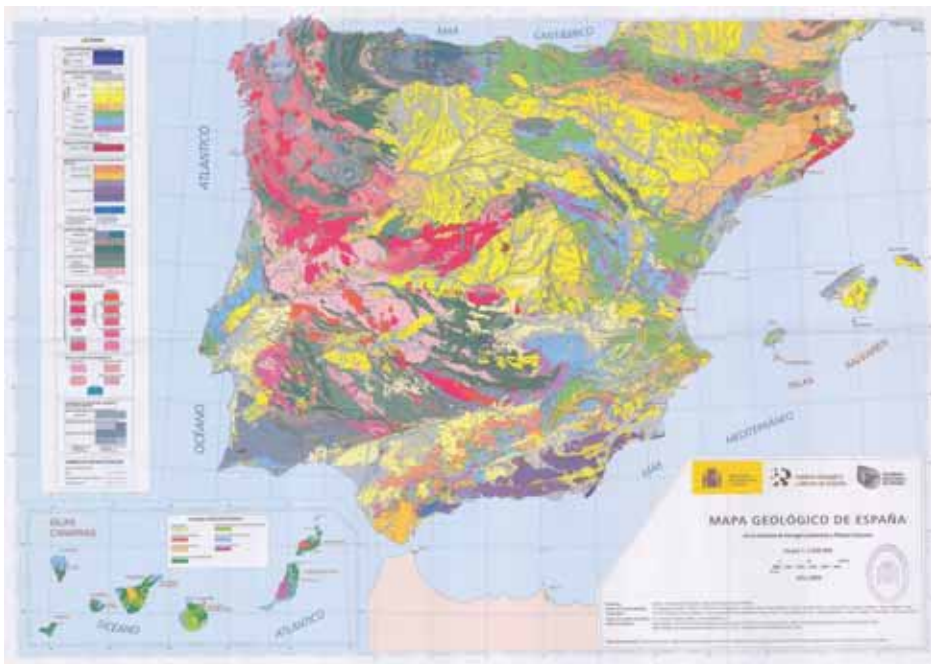


Figura 7. Mapa geológico 1:2.000.000.

La información de un mapa geológico es susceptible de ser utilizada para diversos fines, elaborando mapas derivados de él, destacando de forma selectiva la información que contienen o resaltando aquellas unidades que presentan un interés específico. Así, podemos obtener mapas tectónicos, paleogeográficos, de rocas industriales, de características del terreno para la construcción, de permeabilidad, etc.

Los mapas derivados de la base geológica, y los que representan determinadas características específicas de carácter geológico, se conocen como mapas geotemáticos. Pueden ser de diverso tipo, tanto en su contenido como en sus fines, y estar destinados a uso científico, a fines didácticos o a su utilidad práctica para la resolución de problemas determinados.

En función de su carácter, los mapas geotemáticos pueden incluir de forma parcial o total los elementos básicos de representación del mapa geológico o formar cartografías especiales con alguno de esos elementos de forma exclusiva o preferente.

Son muy diversos y numerosos los mapas geotemáticos que el geólogo puede realizar, dada la importancia y utilidad de éstos. Muchos de ellos se elaboran de forma sistemática mientras que otros requieren de una cierta especialización. Actualmente, la información geológica asociada a procesos recientes es bastante demandada y tiene su expresión gráfica en los mapas del Cuaternario, sobre todo en los mapas geomorfológicos y en los mapas de procesos activos.

- ▶ Mapas geomorfológicos. Son mapas analíticos e infraestructurales de utilidad general, que proporcionan una información organizada y precisa de las formas del terreno y de los procesos geodinámicos que con ellas se relacionan. Su elaboración tiene como base el mapa geológico, del que incorpora todo aquello relativo a la geología de superficie.
- ▶ Mapas de procesos activos. Derivan de los anteriores y en ellos se reflejan los procesos de carácter endógeno o exógeno que han acaecido sobre una zona de estudio. Se destacan los procesos de ladera, erosión, inundación, sedimentación y antrópicos, así como la actividad sísmica, volcánica o geotectónica que hubiese tenido lugar. Proporciona un inventario de procesos geodinámicos funcionales que tiene una organización muy parecida a la del mapa geomorfológico, aunque introducen además rangos de cualificación relativa referidos a la actividad de cada proceso. Ambos mapas en sí mismos son de gran utilidad para obtener otras cartografías geotemáticas muy relacionadas con las obras públicas, el urbanismo, la planificación del territorio, el medio ambiente, la desertización, la erosión y los riesgos naturales, por lo que constituyen un documento básico y originario para tales fines.

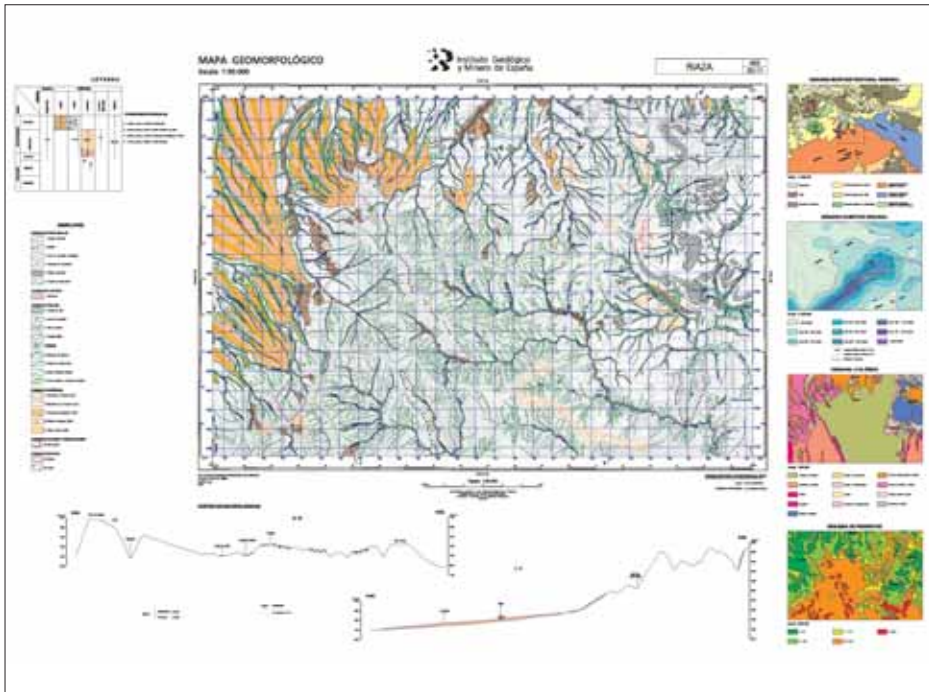


Figura 8. Mapa geomorfológico.

- ▶ Mapas hidrogeológicos. Este tipo de mapas informan sobre las aguas subterráneas y sobre las características hidrogeológicas de las rocas que conforman el sustrato (porosidad, permeabilidad, etc.), así como de la dirección de la escorrentía subterránea. También incluyen información sobre situación de sondeos, pozos de agua, fuentes, manantiales y, a veces, sobre la calidad de las aguas.
- ▶ Mapas metalogénicos, de rocas industriales y, en general, de recursos minerales. Todos ellos proporcionan información sobre la ubicación, relaciones y génesis de los principales yacimientos de un territorio determinado, y sobre las características de las rocas que lo conforman y sus propiedades físicas, para su aplicación desde el punto de vista industrial u ornamental.
- ▶ Mapas de geología ambiental, enfocados a la ordenación y uso del territorio. En los últimos años, el impacto económico y social de los desastres naturales ha propiciado de forma definitiva los mapas de peligrosidad y/o riesgo geológico, otro tipo de cartografía geotemática de gran utilidad y aplicación inmediata.
- ▶ Mapas geotécnicos. Se realizan a diferentes escalas y ponen de manifiesto el comportamiento mecánico de los materiales, así como sus características constructivas. Se realizan para trabajos relacionados con obras lineales (autovías, carreteras, ferrocarriles, etc.), así como también para la construcción de embalses u otro tipo de obras, tales como centrales, polígonos industriales, e incluso

para conocer las características geotécnicas del terreno o sustrato de una determinada zona o dónde se encuentra ubicada una población.

Herramientas que utiliza el geólogo cartógrafo y conocimientos que se requieren

El geólogo cartógrafo en su actividad debe utilizar diversas herramientas y conocimientos geológicos que varían considerablemente según el tipo de materiales que afloran, el contexto geológico de la zona a cartografiar y el tipo de mapa que se ha de realizar (geológico o geotemático). La cartografía geológica necesita de la integración de procedimientos y técnicas propios de diferentes disciplinas, tales como la geología estructural, petrología, estratigrafía y sedimentología, geoquímica, geocronología y paleontología.

La cartografía geológica en cuencas sedimentarias poco deformadas se basa en la caracterización de las diferentes facies sedimentarias que constituyen su relleno, por lo que las disciplinas que el geólogo cartógrafo utiliza en estos materiales son principalmente la estratigrafía y sedimentología, la paleontología, y la petrología sedimentaria, sin descuidar la geología estructural, puesto que también en las zonas externas las rocas se ven afectadas por estructuras tectónicas como pequeñas fallas, diaclasas o flexiones.



Figura 9. Geólogo cartografiando.

Una herramienta muy útil en la cartografía de cuencas sedimentarias es la estratigrafía secuencial. El objetivo explícito de la estratigrafía secuencial es la división del registro sedimentario en conjuntos de estratos genéticamente relacionados, utilizando para ello superficies de discontinuidad y/o sus concordancias, que constituyen los límites de las secuencias sedimentarias. La cartografía de los diferentes tipos de límites de secuencia (discordancias, paleosuelos, cambios bruscos en la vertical, superficies erosivas, etc.) junto con la caracterización litológica, sedimentológica y paleontológica de cada secuencia es una de las labores fundamentales del geólogo cartógrafo en este tipo de cuencas y es la base científica para el conocimiento de su arquitectura y evolución, así como para una adecuada correlación entre distintas cuencas.

El método geocronológico más comúnmente empleado en el estudio de las cuencas sedimentarias es el estudio del contenido paleontológico. De este modo, la bioestratigrafía es la disciplina que permite asignar a las unidades cartografiadas la edad geológica correspondiente y se aplica tanto en cuencas marinas como continentales. En las cuencas continentales, donde el registro paleontológico es relativamente escaso y puntual, se utiliza últimamente y con muy buenos resultados la magnetoestratigrafía que se basa en la realización de secciones sistemáticas, sobre columnas con datos paleontológicos conocidos, con el objeto de obtener un registro de los cambios en la polaridad magnética terrestre tomando como base la orientación respecto a este campo magnético de algunos minerales. Una datación magnetoestratigráfica se obtiene mediante la correlación del registro magnetoestratigráfico local con el registro global de inversiones del campo magnético terrestre denominado "Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética".

En áreas deformadas es necesario emplear las técnicas de la geología estructural. Esta disciplina permite analizar los procesos que intervienen en la deformación de las rocas, tanto a pequeña como a mediana escala, así como de su evolución espacio-temporal. Entre sus objetivos principales se pueden citar, la descripción geométrica de las estructuras que afectan a los cuerpos rocosos, el análisis cinemático y dinámico de los procesos que dan lugar a las estructuras previamente descritas y la elaboración de modelos que expliquen estas estructuras. Estos métodos son suficientes en las zonas externas de un orógeno, que se caracterizan por la existencia de cinturones de pliegues y cabalgamientos, sin deformación interna asociada ni metamorfismo. En las zonas internas de los orógenos es característica la presencia de deformación interna y metamorfismo en las rocas, siendo frecuente en los niveles más profundos la aparición de rocas gnéisicas.

La cartografía en estas áreas debe prever varios aspectos:

- ▶ La intensa deformación y neoformación de minerales puede obliterar la fábrica sedimentaria o ígnea, así como la secuencia estratigráfica inicial.

- ▶ La existencia de foliación de crenulación en las áreas de medio y bajo grado de metamorfismo e importante desarrollo en las zonas de alto grado de procesos de diferenciación por fusión parcial y de las intrusiones ígneas.
- ▶ La mayoría de las estructuras plegadas en estos terrenos no son cilíndricas, desarrollándose complejos modelos de interferencia en tres dimensiones y anchas zonas deformadas por cizalla.

En las áreas de medio y bajo grado de las zonas internas, así como en las zonas externas, la paleontología puede ser una valiosa ayuda para datar las rocas. Sin embargo, en terrenos de alto grado las únicas posibilidades de datación las proporcionan los métodos radiométricos en rocas intrusivas o volcánicas.

En áreas de basamento intensamente deformadas y metamorizadas es indispensable contar también con las técnicas y métodos de la petrología metamórfica, que ha experimentado un gran avance en las últimas décadas gracias a tres líneas de trabajo:

- ▶ Integración de datos de campo con datos de microscopio, variaciones en la composición mineral y datos isotópicos.
- ▶ Modelos experimentales que han posibilitado conocer las características termodinámicas de los principales minerales formadores de rocas.
- ▶ Las investigaciones que han profundizado en la estructura termal de la corteza terrestre y en la modelización de su evolución en distintos ambientes geodinámicos y bajo distintos procesos tectónicos. La combinación de los datos metamórficos y estructurales es imprescindible para deducir los accidentes que separan distintas unidades estructurales. Por ello, la principal herramienta para el estudio de los procesos orogénicos en áreas de basamento es el conocimiento de la relación entre metamorfismo y deformación, lo que se consigue mediante las trayectorias P-T-t-deformación. Con esta herramienta podemos reconocer trayectorias características de diversos marcos geodinámicos, como son zonas de subducción, arcos isla, cuñas orogénicas, zonas extensionales, etc.

En áreas de basamento con predominio de rocas ígneas, la petrología ígnea es una herramienta fundamental que debe emplear el geólogo cartógrafo. Esta disciplina comienza hacia la mitad del siglo XIX con la técnica de la lámina delgada de roca —que introdujo en España José Macpherson, en 1875—, que hace posible la existencia de la microscopía petrográfica. Esta técnica proporciona un análisis riguroso de la mineralogía y relaciones texturales de este tipo de rocas, permitiendo su delimitación cartográfica de una forma precisa y rigurosamente fundamentada.

Más recientemente, las rocas ígneas han sido estudiadas para obtener información sobre los procesos involucrados actualmente en la generación de magmas y su ámbito

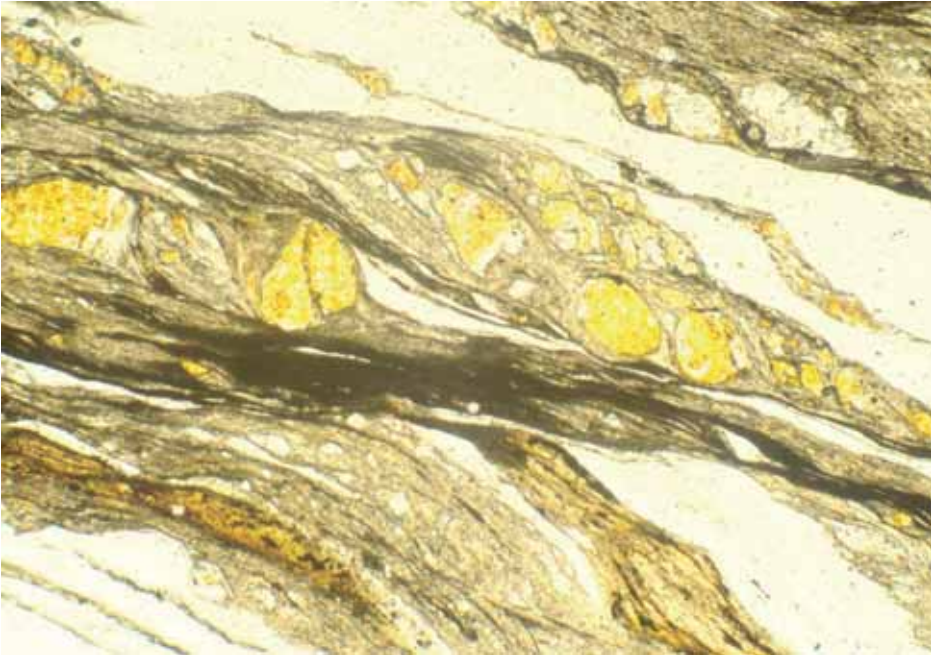


Figura 10. Lámina delgada de roca deformada.

geodinámico. Esta información es fundamental para entender la petrogénesis de antiguas secuencias plutónicas y volcánicas, que puede haber sido parcialmente borrada por la deformación y metamorfismo subsiguientes en áreas de basamento. La caracterización geoquímica de las rocas ígneas originales, por otra parte, nos ayuda a situar las rocas en un determinado ámbito geodinámico de formación en relación con la tectónica de placas.

Los datos que nos proporcionan la geología estructural, petrología metamórfica e ígnea son fundamentales a la hora de cartografiar áreas de basamento y situar su origen y evolución dentro del marco geodinámico correspondiente.

Junto con otros métodos de datación, como la posición estratigráfica relativa y la paleontología, la geocronología es fundamental a la hora de situar en el tiempo los distintos procesos (tectónicos, metamórficos e ígneos) que han sufrido las rocas en un área de basamento en la que es habitual que se superpongan diversos episodios tectonotermales y donde a menudo no existen fósiles o no se observan relaciones claras con rocas de edad conocida.

Los métodos más utilizados son los basados en la desintegración de elementos radiactivos, tanto para datar episodios ígneos (plutónicos o volcánicos), como para datar eventos de cristalización, recristalización metamórfica o deformativos contemporáneos

con el metamorfismo. Éstos son: potasio-argón ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$) y argón-argón ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), para obtener la edad de enfriamiento en rocas ígneas, mediante la datación de micas, hornblenda y polimorfos de alta temperatura del feldespato potásico; rubidio-estroncio ($^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$), usado para la datación de granitos que no hayan sufrido posteriormente un recalentamiento metamórfico, así como para discriminar entre un origen mantélico o cortical de la roca; samario-neodimio ($^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$), muy útil para datar rocas ígneas básicas y ultrabásicas, así como para discriminar entre magmas de origen mantélico o cortical, y uranio-torio-plomo ($^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ y $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$), en circones y monacitas principalmente, muy utilizado para datar rocas ígneas, tanto plutónicas como volcánicas, principalmente ácidas. Recientemente, la aparición de la sonda iónica de alta resolución (SHRIMP), permite obtener edades de distintos eventos térmicos sucesivos sobre un solo cristal zonado.

Utilidad de la cartografía geológica: principales aplicaciones

El mapa geológico es un documento único e imprescindible para conocer el territorio, ya que refleja de un modo gráfico los diferentes tipos de rocas que constituyen el sustrato —invisible para la mayoría— del suelo sobre el que vivimos.

Pero saber de qué está hecho el suelo que pisamos tiene multitud de aplicaciones prácticas. El mapa geológico es básico para la exploración y evaluación de recursos minerales ya sean metálicos, energéticos o bien rocas y minerales industriales, de estos últimos España es un importante productor a escala europea y mundial. Los recursos minerales son precisamente la razón inicial de los grandes planes de cartografía geológica en el mundo.



Figura 11.

En España, el proyecto del Mapa Geológico Nacional (Plan Magna) nació como una consecuencia de los planes de desarrollo de los años sesenta, y su objetivo era “abrir el país a la inversión extranjera para la explotación de los recursos minerales, pensando que sería un importante motor de desarrollo”.

El mapa geológico es también un documento básico en la investigación y evaluación de los recursos de aguas subterráneas, aspecto este último que, a pesar de su crucial importancia, no es, en muchos casos, tenido en cuenta a la hora de planificar y evaluar los recursos de las cuencas hidrográficas.

Los estudios geológico-geotécnicos para las grandes infraestructuras del Estado, o para la construcción de edificios o instalaciones, son otro de los campos donde el mapa geológico es necesario. El reciente debate sobre los problemas del sustrato del AVE Madrid-Lleida, por la existencia de arcillas expansivas, limos colapsables o dolinas en terrenos yesíferos, son una manifestación evidente de esta clara necesidad.

El almacenamiento estratégico de gas, de residuos radiactivos, de CO₂, de desechos industriales o peligrosos, en estructuras geológicas subterráneas implica la necesidad de conocer la geología del terreno a utilizar y su comportamiento pasado, presente y futuro. La cartografía geológica es un instrumento crucial en este tipo de estudios y proyectos.

Finalmente, otro de los grandes campos de aplicación del mapa geológico es la prevención y mitigación de los riesgos geológicos (deslizamientos, inundaciones, erosión, terremotos, riesgos volcánicos, etc.), donde el mapa geológico se convierte en el mejor instrumento de planificación, para evitar la construcción de viviendas, obras, campings o infraestructuras en zonas con riesgo evidente.

Referencias bibliográficas

Barrera, J. L. (2000). Demanda científica, técnica y social de la Cartografía Geológica del ITGE y evolución futura. Boletín Geológico y Minero. Número especial: 85-94.

Bernknopf, R. L.; Brookshire, D. S.; McKee, M. J. y Soller, D. R. (1997). Estimating the Social Value of Geologic Map Informations: A Regulatory Application. Journal of Environmental Economics and Management 32, Article nº EE960963: 204-218.

Bernknopf, R. L.; Brookshire, D. S.; Soller, D. R.; McKee, M. J.; Sutter, J. F.; Matti, J. C. y Campbell, R. M. (1993). Societal Value of Geologic Maps. U.S. Geological Survey. Circular 1111, 53 pp.

Ecominsa (1983). Estudio de la rentabilidad y valoración de la cartografía básica infraestructural realizada por el IGME. Informe IGME, Madrid, 94 pp.

García-Cortés, A. (2000). La Cartografía Geológica del IGME: líneas de actuación futura. Boletín Geológico y Minero. Número especial: 94-95.

García Cortés, A. (2000). La Cartografía Geológica y Geotemática del ITGE, una experiencia sesquicentaria con vigencia actual y vocación de futuro. 150 años del ITGE: estudio e investigación en Ciencias de la Tierra. ITGE, Madrid.

García-Cortés, A.; Vivancos, J. y Fernández-Gianotti, J. (2005). Evaluación económica y social del Plan MAGNA. Evaluación económica y social del Plan MAGNA de cartografía geológica escala 1: 50.000. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 28-58.

Goy, J. L. (2000). Evaluación crítica de la cartografía geológica del ITGE: finalidad y evolución. Boletín Geológico y Minero. Número especial: 59-64.

Portero, J. M. (2000). Evaluación crítica de la cartografía geológica del ITGE: la cartografía MAGNA en terrenos sedimentarios. Boletín Geológico y Minero. Número especial: 65-72.

Rodríguez Fernández, L. R. (1991). Las cartografías temáticas producidas por el Instituto Tecnológico Geominero de España. IV Jornada Técnica Temática de la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección. Madrid.

Rodríguez Fernández, L. R. (1992). Las cartografías temáticas producidas por el Instituto Tecnológico Geominero de España: La Cartografía MAGNA y otras cartografías geológicas derivadas. MAPPING 3: 70-80.

Rodríguez Fernández, L. R. (2000). Los mapas geológicos producidos por el ITGE: evolución, actualidad y futuro. Boletín Geológico y Minero. Número especial: 15-36.

Rodríguez Fernández, L. R. (2000). Actualidad y futuro de los mapas geológicos del ITGE. Tierra y Tecnología 20: 21-32.

Rodríguez Fernández, L. R. (2005). El Plan MAGNA, evolución histórica y perspectivas futuras. Evaluación económica y social del Plan MAGNA de cartografía geológica escala 1: 50.000. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 13-28.

El geólogo como enseñante universitario

Josep Gisbert

Profesor Titular del área de Petrología del departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza

Introducción: para qué sirve la docencia universitaria

El profesor universitario puede considerarse privilegiado, el estudiante que tiene en el aula es una persona que ha elegido estudiar las materias geológicas. Ésta es la situación que debería existir desde primer curso, pero que no es del todo cierta dadas las peculiaridades del sistema de acceso a la universidad del Estado español. En todo caso, entre segundo y tercer curso la situación se normaliza y todos los presentes acompañan a su persona la mentada decisión sobre su vida profesional.

Por su parte, el profesor debe conciliar un currículum investigador —que es su principal fuente de promoción profesional— con una formación didáctica que le permita desenvolverse en el aula con eficacia docente. No obstante, para conseguir que los estudiantes aprendan hace falta otro requisito importante: que el profesor en mayor o menor medida practique la profesión —sospecho que todos estarán de acuerdo en que difícilmente enseñará la profesión alguien que no la practique—. Este último aspecto es uno de los que más contradicciones provoca entre los docentes universitarios y otros sectores profesionales de la geología, pues al ser la investigación y la creación de un currículum académico la principal actividad profesional de muchos docentes, difícilmente pueden formar a sus pupilos en geología aplicada. La adecuada resolución de este problema es una de las claves para que el centro universitario cumpla su papel social y consiga formar profesionales de la geología.

El trabajo, las herramientas y los conocimientos empleados

En cuanto que docente, además de conocer la materia de su especialidad, debe conocer psicología y dinámica de grupos; es impensable un docente que no tenga una faceta sociable y comunicativa ya que debe dominar la destreza de la transmisión de conocimientos y el entusiasmo por la profesión a otras personas.

Los que hemos practicado la dinámica de grupos conocemos el enorme potencial que significa que en lugar de una sola persona (el profesor) piensen y actúen 20-60 personas (los estudiantes). En la etapa en que impartí Cartografía Geológica en segundo curso de licenciatura, asignatura en la que los estudiantes hacían proyectos y cada promoción conseguía por sus trabajos ingresos suplementarios —que llegaron a alcanzar los dos millones de las antiguas pesetas— con la consiguiente calidad de las prácticas asociadas. El profesor también ganó, además de algún dolor de cabeza, el premio nacional de innovación educativa.

Si analizamos por especialidades, podemos decir que en la paleontología concurre el espíritu coleccionista con sus aplicaciones museísticas y el profesor puede transmitir, además de los contenidos paleontológicos, las habilidades didácticas, pues un profesional paleontólogo puede dedicarse toda su vida a aspectos tan populares como la vida y milagros de los dinosaurios. Afortunadamente, ya quedan lejos los tiempos en los que teníamos que aprender la larga lista de ammonites jurásicos con su dispersión estratigráfica para poder aprobar, suele bastar ahora con trabajos de clasificación notablemente más racionales.

En cristalografía y mineralogía también han quedado atrás (salvo paleontológicas excepciones) los tiempos en que hacía falta identificar de visu ingentes colecciones de minerales y tarugos. Ahora los métodos y procedimientos de laboratorio colaboran con el estudiante para abastecer su acervo en destrezas de identificación mineral.

Las geodinámicas siguen como siempre, pues su “campo” ha significado el lado más agradable y que recogía y recoge lo que se considera el cogollo de la actividad profesional. La externa en su versión más paisajística y distendida pero acompañada ya de una de las trinitades del dios de la geología: el mapa. La geodinámica interna más metódica y sistemática, siempre con la ayuda de la máquina geológica por excelencia: la brújula.

La estratigrafía es la más seria en su trabajo de campo acompañada siempre de su vara de Jacob para guiar al rebaño de estudiantes hacia la potencia verdadera y anotar toda su sabiduría en el libro de los diez mandamientos: el cuaderno de campo, verdadero expediente profesional de todo geólogo.

La petrología es el fundamento, el material sobre el que se levanta el dogma de la geología y viene siempre de la mano de sus tres fieles aliados: maza, martillo y microscopio.

Pero permítanme que sea más concreto glosando mis tiempos de enseñante de cartografía geológica, materia síntesis de las ciencias de la Tierra y cantera de geólogos/as curtidos por el sol, el hambre y el frío que han crecido en sabiduría regados por generosas botas de vino.

En equipos de tres a cinco personas los estudiantes eran lanzados del autobús con una única ayuda: el espíritu santo de un mapa. Con él debían seguir una ruta prefijada con diferentes estaciones geológicas. En cada una de las estaciones de su via crucis encontraban rocas, minerales y fósiles para clasificar, buzamientos que debían medir y croquis panorámicos que dibujar. Obviamente las primeras salidas se hacían en terciarios horizontales y las últimas en paleozoicos retorcidos. Además, cada equipo de estudiantes se había comprometido —como parte de su trabajo de curso— a realizar una de las excursiones como profesores. Así, además de los dos profesores “titulares” había siempre de tres a cinco profesores voluntarios lo cual conducía a un mayor aprovechamiento de la excursión.

Las relaciones profesionales

Las visitas a centros profesionales y la realización de prácticas de estudiantes en ellos siempre ha resultado algo gratificante por ambas partes. Más complicado ha sido el que las mentadas prácticas tuvieran reconocimiento académico por la leguleya mentalidad de que hay que evaluar unas prácticas que coincidan exactamente con el programa de la asignatura aprobado en el BOE. Si no se hubiera flexibilizado este criterio nunca habríamos conseguido dar valor académico a las prácticas de segundo ciclo y hemos de reconocer que la permisividad actual se debe más a la convergencia europea que a la flexibilidad académica.

Las buenas relaciones del profesor universitario con los geólogos de empresa son fundamentales para desarrollar adecuadamente este tipo de prácticas y es frecuente que el geólogo de la empresa —antiguo alumno del profesor— le recuerde delante de todos los alumnos —eso sí, en tono jocosos y distendido— los suspensos e injusticias que él tuvo que sufrir de su mano. Esto, además de un trago para el profesor, es también un aliciente para los estudiantes a seguir adelante a pesar de los posibles tropiezos; en suma, un ejercicio hartos provechoso en el que los estudiantes pueden “ver”, en carne ajena, su futuro próximo.

Más complicado ha sido siempre el ejercicio “profesional” del profesor universitario como vehículo de una formación continua y aplicada que debe transmitir a sus estudiantes. El

meollo de este problema reside en que, históricamente, la principal labor profesional ha sido una investigación muy académica y poco aplicada. Sólo conocemos dos vías de resolver adecuadamente esta contradicción: la primera es que el profesor universitario haga una investigación aplicada que lo mantenga próximo al campo profesional; la segunda, que trabaje en investigación aplicada abriendo nuevos campos de actividad profesional.

Referente a la primera posibilidad, podemos comentar que el reciente auge de parques temáticos —entre los que hay geológicos y paleontológicos—, itinerarios didácticos señalizados y espacios naturales protegidos, abre una vía profesional que conjuga la práctica profesional y la didáctica. Ya existen consultoras dirigidas por geólogos que viven de esta actividad que en sus inicios nació desde las universidades.

La actividad más aplicada de los paleontólogos —al margen de la museística y los parques jurásicos— ha sido la de la clasificación de fósiles guía en trabajos geológicos para empresas, dado que la superespecialización necesaria para esta actividad sólo es viable en un contexto universitario.

Los geomorfólogos colaboran con trabajos ambientales e hidrología superficial y subterránea, los estratígrafos se implican en todos los trabajos que precisen de cartografías geológicas generales y los especialistas en geología estructural lo hacen en geotecnia. Los mineralogistas siempre han mantenido una estrecha relación con las empresas de actividad minera y los petrólogos lo han hecho en cualquier lugar donde la actividad económica esté sustentada por rocas cuya textura y mineralogía sea importante en la calidad/rentabilidad del proceso productivo.


No obstante, en esta actividad profesional próxima a las empresas existe otro tema conflictivo. La universidad, en su condición de organismo público, debe apoyar la actividad privada sin hacerle la competencia, al menos en trabajos que sean los propios de la actividad privada. Los talleres de láminas delgadas son un buen ejemplo. Esta actividad (realización de laminas delgadas) no ha llegado nunca a ser rentable para una empresa y ciertamente las universidades han realizado un papel de apoyo tanto a la investigación como a las necesidades de muchas empresas. Sin embargo, estos laboratorios universitarios suelen estar capacitados para realizar ensayos tecnológicos normalizados. En este campo es lógico que se mantengan fuera de la competencia comercial y sólo actúen en el campo privado en actuaciones puntuales como son procesos judiciales, consultorías independientes, evaluaciones de ensayos poco actualizados, desarrollo de nuevos ensayos y medida de algún parámetro que no posea todavía ensayo normalizado.

Finalmente, la segunda posibilidad de que el profesor universitario lleve una actividad profesional productiva es la de abrir una línea de actividad nueva.

Yo, en mi condición de petrólogo puedo hablar del desarrollo de temas de ciencia de los materiales aplicados a materiales pétreos de usos constructivos (rocas, morteros y ladrillos) y a la restauración de patrimonio histórico (véase, por ejemplo, el artículo de *Tierra y Tecnología*, n° 22 sobre “Estratigrafía de materiales pétreos...”). La ciencia de los materiales es un campo interdisciplinar que se ha desarrollado con mucho ímpetu y es puntero dado su notable interés aplicado a procesos productivos. Los geólogos no podemos quedarnos al margen de un campo científico tan importante y emergente.

Como consecuencia de esta actividad de investigación aplicada —que todavía mantengo— hay ya varios licenciados que cobran sus honorarios profesionales ejerciendo en el campo de la ciencia de los materiales.

Geología en la cooperación al desarrollo



Ángel Carbayo
Presidente de Geólogos del Mundo
Juli Rubio
Geólogos del Mundo

Introducción

¿Para qué sirve la geología en la cooperación al desarrollo?

La geología aporta el conocimiento del substrato sobre el que se desarrollan todas las actividades de nuestra sociedad, así como de los procesos dinámicos que modelan la superficie del planeta. Este conocimiento debe aplicarse en la prospección de afectaciones, ya sea por el uso de los recursos naturales (agua subterránea, minería, recursos energéticos, forestales...) como por la incidencia de los procesos naturales sobre la población y sus actividades, para la realización de planes de desarrollo que contengan la gestión ambiental y de riesgos como garantes de su sostenibilidad. La geología en la cooperación al desarrollo debe procurar la sensibilización y la formación de técnicos y tomadores de decisiones en este sentido, a la vez que se facilitan los procesos para la generación de información necesaria para la realización de estos planes de desarrollo, procurando además la generación de procesos participativos, integradores que contemplen la equidad de género y que sean sostenibles en el tiempo.

Presentación de Geólogos del Mundo

A propuesta de la Federación Europea de Geólogos, el 14 de febrero de 1999, y por decisión del Colegio Oficial de Geólogos (ICOG), se crea la ONG Geólogos del Mundo (GM).

Esta queda definida en sus Estatutos como una organización no gubernamental, con fines no lucrativos, que pretende poner el conocimiento geológico, así como las técnicas

y métodos aplicados en el campo de la geología al servicio de las comunidades más necesitadas del mundo. En el año 2003 es declarada como Entidad de Utilidad Pública por el Ministerio del Interior.

Desde un principio GM nace ligada al ICOG, con quien firma un convenio de colaboración que contempla la prestación de infraestructura de las oficinas cedidas por el último a la ONG, así como también la aportación de un 0,7 por ciento de sus ingresos en una primera etapa, y que ha sido aumentada a un 1 por ciento de los ingresos en la actualidad. A esta cantidad hay que sumar las aportaciones de las cuotas de los socios cuyo número al día de hoy supera la cifra de 500. El total de las aportaciones anteriores permiten a GM soportar en gran parte los gastos fijos del escaso personal que posee.

Como contrapartida a la ayuda económica recibida del ICOG, GM realiza cuatro importantes funciones, a saber:

- ▶ Fomentar la aplicación de la geología en la resolución de problemas que afectan al bienestar, economía y a veces las vidas de las comunidades de las regiones en las que trabaja.
- ▶ Fomentar el empleo de profesionales de la geología en la investigación, planificación, organización y formación, especialmente en los campos de la geología ambiental, ingeniería geológica, hidrogeología y recursos geológicos.
- ▶ La capacitación y formación de jóvenes geólogos, recién licenciados, que participen en los proyectos como voluntarios y técnicos, adquiriendo tanto experiencia profesional como desarrollo personal en el transcurso de sus actividades, y que en el segundo caso viene dado por el contacto con diferentes realidades y culturas.
- ▶ Difusión del geólogo y la geología en distintos medios de comunicación, audiovisuales o escritos, así como en diversos ambientes universitarios tanto españoles como extranjeros.

Organización de GM

Los Estatutos elaborados en febrero de 1999 y presentados en su día tal como es preceptivo a la autoridad competente del Ministerio del Interior y a la AECL, en cuanto a la organización se refiere, definen a GM como una asociación cuyo órgano directivo está constituido por una Junta Directiva que consta de un presidente, un vicepresidente, un secretario, un vicesecretario, un tesorero y varios vocales —en nuestro caso diez— y en donde se indican las funciones correspondientes. La Asamblea General es el máximo órgano decisivo de la asociación.

Por otro lado, se han constituido hasta ahora varias delegaciones, a saber: Andalucía, Aragón, Asturias, Castilla-La Mancha, Cataluña, Madrid, País Vasco y El Salvador. El delegado ejerce las funciones de organización, gestión, representación, búsqueda de financiadores, manejo de fondos, etc., de todas las actividades de la delegación y forma parte de la Junta Directiva como vocal —a excepción de los delegados de los países donde se realizan los proyectos, tal como en El Salvador, que tiene únicamente funciones ejecutivas de actuación dentro del país—, con el resto de las delegaciones existentes en España.

La organización interna de GM, así como la relación entre las delegaciones y entre delegaciones y proyectos está establecida en el Reglamento de GM. Este documento enmarca las funciones de los diferentes cargos dentro de los proyectos así como sus derechos y obligaciones con respecto a la institución. En él se establece también cuál debe ser el procedimiento de selección para la contratación de personal, ya sea en sede o expatriado.

Queremos resaltar el proceso de selección de personal para proyectos, que consiste en los pasos siguientes:

- ▶ Envío del perfil profesional que se requiere a todos los socios.
- ▶ Si entre los socios no existe el perfil solicitado, se difunde el mismo en la bolsa de empleo del ICOG, universidades, etc.
- ▶ Selección del candidato por el coordinador de la delegación solicitante.
- ▶ Confirmación del mismo por el Comité Ejecutivo (presidente, vicepresidente y un miembro más de la Junta) así como por el responsable de la delegación en la que se ejecuta el proyecto.

Para cada puesto de trabajo de un proyecto se elaboran unos términos de referencia en los que se especifican los derechos y obligaciones que los ligan a GM.

Áreas de actuación de GM

Las actividades que realiza GM están encaminadas a acompañar los procesos de desarrollo emprendidos por nuestros socios locales, sean éstos organizaciones comunitarias, instituciones gubernamentales o no gubernamentales. Este acompañamiento puede ser dividido en cuatro áreas de intervención:

- ▶ Sensibilización de la población y divulgación de la geología (figura 1).
- ▶ Formación de especialistas y promoción de los estudios de geología.
- ▶ Organización e incidencia institucional, ya sea para la coordinación de instituciones y organismos locales, nacionales e internacionales, ya sea para la organización y coordinación de la participación de organizaciones de base.

- ▀ Investigación geológica aplicada a la gestión ambiental, ya sea para la gestión de riesgos geológicos, del recurso hídrico o de los recursos geológicos, y el conocimiento de las conclusiones de estas investigaciones para su integración en los planes generales de desarrollo.



Figura 1.

De las cuatro áreas de intervención de GM el trabajo técnico geológico se centra en la investigación geológica que se refiere a los estudios de campo para la caracterización de amenazas geológicas (inundaciones, inestabilidad de taludes, huracanes, terremotos, sequías...), estudios hidrogeológicos y de recursos hídricos para el abastecimiento de agua potable.

Además de los proyectos propios en los que interviene GM, colabora con todas las asociaciones, organismos e instituciones que soliciten su asesoramiento en aspectos relacionados con nuestras áreas de intervención.

El desarrollo de estas actividades requiere, en numerosas ocasiones, de la participación de profesionales expatriados, aunque es política de GM emplear en sus intervenciones el máximo recurso local, sin discriminación de sexo o religión.

Actores de un proyecto de GM

La razón de ser de los proyectos geológicos de cooperación internacional son los beneficiarios, afectados por una incidencia de carácter geológico (ausencia de agua para abastecerse, poblaciones ubicadas en zonas de alto riesgo, inundaciones recurrentes, etc.). Los beneficiarios deben estar agrupados y deben presentar sus necesidades en forma de solicitud, con la que desde el principio deben estar identificados, comprometiéndose su participación y colaboración durante la realización del proyecto y aportando en los casos que sea necesario terrenos, mano de obra, materiales, etc. Su esfuerzo y compromiso resulta decisivo para el mantenimiento de los resultados alcanzados.

Los proyectos son apoyados a través de socios locales o contrapartes, cuya función consiste en dar apoyo logístico y también económico al proyecto pero, sobre todo, velar por la continuidad de los resultados alcanzados una vez que finaliza el proyecto. Dicha contraparte local suele ser habitualmente una ONG o bien un ayuntamiento y, en algunos casos, es esta misma la que plantea las necesidades y datos que dan origen a la elaboración del proyecto por parte de GM. La relación con la contraparte queda fijada a

través de convenios generales de entendimiento o colaboración, y convenios específicos para cada proyecto en particular.

Lógicamente, en los resultados finales del proyecto hay que implicar a todos los actores locales, instituciones gubernamentales y organizaciones de base e internacionales que estén presentes en el sector o en la región.

Finalmente, un actor decisivo para la ejecución de un proyecto lo constituye el financiador, al cual se debe convencer de la viabilidad y utilidad del proyecto a realizar. Las fuentes de financiación para los proyectos de GM son, básicamente, las agencias descentralizadas de cooperación al desarrollo españolas (gobiernos autonómicos, ayuntamientos) y fundaciones privadas, sin olvidar la AECI (Agencia Española de Cooperación Internacional) o la Unión Europea. También dispone GM de donaciones privadas de particulares y empresas privadas.

Tipos de trabajos realizados por GM

Hasta el momento presente GM ha realizado los tipos de trabajo siguientes:

- ▶ Emergencias.
- ▶ Planificación post-emergencia.
- ▶ Gestión de riesgos.
- ▶ Abastecimientos de aguas subterráneas.
- ▶ Formación de técnicos locales.

Emergencias

La emergencia tiene lugar cuando la afectación por fenómenos naturales, en este caso, ya ha sucedido. Por sus características técnicas y por su finalidad, GM no es una organización de ayuda humanitaria propiamente dicha, por lo que su intervención durante las emergencias es limitada, pero no por eso menos importante.

En casos de emergencia en los países en los que está interviniendo GM, el equipo de técnicos desplazado sobre el terreno se organiza según el Plan de Emergencia. Se reportan sobre el terreno en el que están trabajando, dando una rápida lectura de la afectación en cada lugar y se coordinan con las instituciones locales encargadas de la gestión de la emergencia (Protección Civil, Cruz Roja u otros) (figura 2).

Una de las principales aportaciones que se pueden realizar desde GM es la de presentar un análisis de factibilidad de ubicación para campamentos de refugiados u hospitales de campaña en función de las características geomorfológicas e hídricas del área.



Figura 2.

La recopilación de información sobre la dinámica y la evolución de los procesos geológicos desencadenantes de la emergencia es de vital importancia para la comprensión de su comportamiento y poder, así, establecer las pautas adecuadas de respuesta, prevención y mitigación para futuros eventos. La afectación por eventos naturales (huracanes, terremotos, etc.) puede ocasionar cambios sustanciales en el paisaje que afectarán el modo de vida de las poblaciones afectadas. Esta afectación requiere de un control y monitoreo inmediato que, a menudo, debido a las prioridades impuestas por la emergencia, son desatendidos. Su control debe permitir el inventariado y clasificación para la priorización de las intervenciones post-emergencia de reconstrucción y rehabilitación, que serán los que devolverán a la normalidad a los afectados.

Planificación post-emergencia

La post-emergencia es el periodo de tiempo entre la emergencia y la “vuelta a la normalidad”. Principalmente está ocupada por la realización de tareas de rehabilitación y reconstrucción además de la atención a los damnificados. Las labores de GM en este periodo consisten en la evaluación de daños, ahora ya de forma más pausada, y la diagnosis de obras necesarias para la mitigación de futuras emergencias debido a los cambios sufridos en el paisaje. Igualmente se realizan los estudios necesarios para la reconstrucción de la infraestructura afectada.

El trabajo se realiza en colaboración con las instituciones nacionales, ministerios de Obras Públicas, de Medio Ambiente, Servicios Geológicos... pero también con gobiernos locales y con comunidades de afectados.

Es un tiempo de oportunidad muy importante para la planificación futura. Los medios de comunicación, los políticos y la población en general se hacen eco de las recomendaciones y diagnósticos de especialistas que recomiendan, en general, mayor inversión y planificación en gestión de riesgos.

Un ejemplo de esto está en el caso de El Salvador, que creó el equivalente a un servicio geológico (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SNET) después de que en tres años fuera afectado por el huracán Mitch (noviembre 1998) y por dos terremotos de considerable magnitud (enero y febrero 2001). La creación del SNET implica un acto político, que supone un pequeño cambio en la actitud de los gobernantes que refleja un incremento considerable de la concienciación de políticos y población hacia los riesgos geológicos. Este fue un primer paso de un largo camino, aunque todavía falta mucho por avanzar, como demuestran las emergencias del pasado 2005 debidas a las lluvias y a la erupción del volcán de Santa Ana, también en El Salvador.

Gestión de riesgos

Geólogos del Mundo concibe la gestión de riesgos como una parte fundamental de la planificación del desarrollo. Son componentes de la gestión de riesgos (GR) el estudio de las amenazas, la prevención, la mitigación y la planificación. Para implementar la GR es necesario contar con la participación e implicación del mayor número posible de actores (comunidades, gobiernos locales, instituciones nacionales, ONG locales e internacionales, empresas, policía y fuerzas armadas, etc.).

La función de GM en los proyectos de GR es la de acompañar en los procesos de organización de la población y de los gobiernos locales, la formación y constitución de comités de gestión de riesgos, la capacitación de técnicos municipales y de otras instituciones y finalmente, de los estudios para la caracterización de las amenazas geológicas presentes.

Los resultados de estos proyectos son la coordinación entre los actores implicados (inter e intra-institucional, con los gobiernos locales, con las comunidades), la constitución de comités de emergencias y de gestión de riesgos y la presentación de materiales técnicos (documentos y mapas de susceptibilidad, amenazas, riesgos, usos del suelo, específicos geológicos, etc.) para la gestión del territorio en formatos populares y técnicos. El resultado último es un incremento de la sensibilización de la población y de los que

toman las decisiones en aspectos relacionados con la gestión de riesgos y la inclusión de la gestión de riesgo en el ordenamiento territorial y la planificación del desarrollo.

Las amenazas geológicas son producidas por fenómenos naturales (lluvias intensas, terremotos, volcanes...) que afectan negativamente a los intereses de una sociedad instalada en un determinado territorio. Pero también pueden ser generadas por la intervención de esta sociedad sobre el mismo territorio, en obras de infraestructura mal situadas o bien durante el aprovechamiento de los recursos geológicos.

Los recursos geológicos y su aprovechamiento son fundamentales para el desarrollo de las sociedades. Este aprovechamiento puede ser origen de graves afectaciones en el medio ambiente, además de desencadenante de amenazas geológicas. Por este motivo, cuando queremos garantizar la sostenibilidad de los planes de desarrollo en un determinado lugar, debemos incluir en él la gestión de riesgos geológicos y la gestión de recursos geológicos.

Abastecimiento de aguas subterráneas

Como es sabido la carencia de agua potable es un problema que afecta a más de 1.200 millones de habitantes en todo el mundo.



Figura 3.



Figura 4.



Figura 5.

Resulta conocido que el agua subterránea es un recurso geológico renovable o semirrenovable, por lo que se debe ser muy cuidadoso con su explotación. Por ese motivo, GM pone especial atención en la organización, formación y capacitación de las Juntas de Aguas que deberán gestionar el sistema de abastecimiento que determine el proyecto. Este sistema tiende a dar autonomía a las comunidades organizadas, responsabilizándolas de la gestión y mantenimiento del sistema. En el momento de la organización de estas Juntas se busca el acompañamiento e implicación de los gobiernos municipales, que pueden aportar experiencia administrativa, sostenibilidad e imparcialidad.

Cada proyecto de abastecimiento deberá adecuarse a la realidad sociocultural específica del grupo de beneficiarios, adaptándose a la realidad institucional del país en el que se actúa, además, por supuesto, de las condiciones hidrogeológicas del acuífero que se pretende explotar. GM ha realizado proyectos de abastecimiento de aguas subterráneas con éxito en América Central y del Sur, así como en África.

Hasta la fecha, GM ha acumulado experiencia en la perforación de pozos de grande y mediana profundidad, en América Central y del Sur (figura 3), y en la excavación de pozos de gran diámetro y explotables a mano mediante poleas en África (figuras 4 y 5).

Como resultado de estos proyectos podemos destacar el aumento del nivel organizativo de las comunidades con las que se ha colaborado, la mejora de los indicadores de

desarrollo humano concernientes a salud y alimentación, la coordinación de las juntas comunales entre ellas y con instituciones gubernamentales centrales y locales.

Formación de técnicos locales

En todos los proyectos de GM la formación es un eje transversal cuando no un objetivo en sí misma. En este último caso la formación se concibe como cursos de especialización, bien para profesionales de ciencias de la Tierra, bien para profesionales o recién titulados de carreras afines, especialmente en aquellos países con carencias importantes de enseñanza en ciencias geológicas. Uno de los colectivos meta de este tipo de intervenciones son aquellos técnicos municipales o gubernamentales que, o bien están relacionados con el territorio en sus labores diarias, o bien forman parte de los grupos de tomadores de decisiones relacionadas con el territorio o con los planes de desarrollo.

Para la realización de estas actividades GM procura contar con los recursos locales disponibles, para lo cual se establecen convenios marco de colaboración con diferentes centros universitarios u otras instituciones técnicas.

En todas estas intervenciones se potencia la creación de redes de trabajo, la transparencia y la publicidad de resultados, con la finalidad de potenciar la cooperación técnica y los diferentes trabajos de investigación.

Concretamente en El Salvador no existen profesionales de la geología, razón por la cual GM ha realizado tres cursos de larga duración en las universidades de aquel país, impartidos para ingenieros, químicos, arquitectos, etc. En los proyectos iniciados en el 2006 GM ya implica a técnicos de más de 25 ayuntamientos para que posteriormente puedan realizar una gestión ambiental integral y sostenible de sus municipios, teniendo en cuenta los riesgos geológicos así como los recursos geológicos, incluyendo el agua subterránea.

Los conocimientos que aporta GM

Geólogos del Mundo aporta a sus proyectos los conocimientos técnicos necesarios para la caracterización de riesgos y recursos geológicos, que deben permitir la realización de una planificación más detallada y concreta, a la medida del territorio en cuestión y de las necesidades de su población. Pero sobre todo GM pretende servir de catalizador de los esfuerzos de desarrollo y de gestión de diferentes actores en un determinado lugar, para procurar, entre todos, conseguir un desarrollo sostenible teniendo en cuenta una gestión ambiental integral y participativa.

Herramientas utilizadas en los proyectos de GM

Para el desarrollo de sus actividades GM procura emplear las mismas metodologías y recursos que las disciplinas geológicas de las que se sirve. Ahora bien, en muchos casos, debido a la inaccesibilidad a determinadas tecnologías o la carencia de recursos, es necesario adecuar las metodologías de trabajo o los instrumentos para poder conseguir unos resultados de mantenimiento a bajo coste, procurando, en todo momento, conservar el rigor y la correcta aplicabilidad de los datos obtenidos.

En numerosas ocasiones no se dispone de la información necesaria para la aplicación de metodologías corrientes en los países ricos, por lo que se deben improvisar estaciones de aforo o meteorológicas básicas. Para esto se cuenta con la capacitación y formación de personal específico en las contrapartes o comunidades con las que se trabaja.

A grandes rasgos podemos citar como las herramientas más comunes de trabajo de GM:

- ▶ Estudio de la información geológica existente del área.
- ▶ Fotointerpretación geológica.
- ▶ Reconocimiento de campo.
- ▶ Análisis de aguas (figura 6).



Figura 6.

- ▶ Sondeos eléctricos verticales.
- ▶ Sondeos de exploración (en caso de campaña para la perforación de pozos).
- ▶ Construcción de pozos de gran diámetro.
- ▶ Carpetas técnicas de distribución de aguas.
- ▶ Sistemas de Información Geográfica (bases de datos y cartografías).
- ▶ Programas específicos (hidrogeología, inundaciones, avenidas, etc.).

Ahora bien, a este trabajo técnico es necesario añadir el trabajo de concienciación de la población, la organización y formación de beneficiarios y contrapartes y el trabajo de concertación entre los diferentes actores involucrados. Para este trabajo es fundamental la implicación de la contraparte, a quien se le solicita experiencia en la organización social y participativa.

El trabajo para la concertación institucional requiere de procesos de realización largos y consensuados a través de talleres y mesas de trabajo conjuntas y por separado con cada una de las partes. Esta parte de los proyectos, a menudo gris y desapercibida, constituye uno de los principales frentes de trabajo, puesto que pretende un cambio de hábitos del mismo en las instituciones burocráticas.

Por este motivo consideramos que éste puede ser uno de los mayores éxitos de los programas de trabajo de GM para el desarrollo, complementario con la contribución al conocimiento geológico que aporte el proyecto.

El trabajo técnico de GM implica tener que participar en diferentes fases del proceso de formación y organización de las comunidades beneficiarias, por lo que además de capacidad técnica y de síntesis, se requiere un especial don de gentes, interés por los temas de carácter social, capacidad de integración en sistemas culturales y de valores diferentes y capacidad de comunicación. Además todo esto debe poder expresarse a diferentes destinatarios, desde el específico técnico-científico, hasta niveles de divulgación popular o infantil.

Evidentemente todo esto, sumado a condiciones de trabajo extremas, exige de los técnicos de GM un nivel de compromiso y de profesionalidad muy elevado que, sin embargo, aporta diferentes compensaciones en el nivel profesional y personal, que dan lugar a la permanencia y profesionalización de los participantes en diferentes proyectos.

Esto ha llevado al reconocimiento de la labor de GM y, sobre todo, de sus técnicos, por las instituciones locales e internacionales con las que se ha colaborado, que en algún caso ha supuesto una promoción e incorporación a una organización internacional.

Evaluación y seguimiento de un proyecto

Geólogos del Mundo aplica la metodología del Enfoque de Marco Lógico (EML) a todos sus proyectos. En esta metodología se define un objetivo general, que el proyecto pretende alcanzar, así como uno o varios objetivos específicos, varios resultados esperados que se obtendrán al realizar con éxito una serie de actividades debidamente definidas y programadas. Para verificar la consecución de todo esto, esta metodología define unos indicadores objetivamente verificables, que deben permitir a cualquier observador verificar la consecución de los resultados esperados, y unas fuentes de verificación de los indicadores.

En base a estos parámetros, GM realiza informes internos mensuales sobre el avance de los proyectos. Trimestralmente se remite un informe financiero del proyecto, detallando y desglosando cada uno de los gastos por partidas y subpartidas. En función de los requisitos de cada financiador, se prepara un informe de seguimiento y otro, al finalizar las actividades de cada proyecto.

Geólogos del Mundo, por ser Entidad de Utilidad Pública (desde julio del 2003), realiza cada año una auditoría pública de sus actividades. Por otro lado, de acuerdo con la legislación vigente en El Salvador, la delegación en Centroamérica, sita en San Salvador, realiza una auditoría anual de sus actividades que presenta al Ministerio de Hacienda de dicho país.

Con qué profesionales se relaciona GM

Para el desarrollo de sus actividades GM se relaciona tanto con profesionales de la geología de los países en los que interviene como con los de España. La mayoría de los técnicos de GM son jóvenes licenciados con especialización en alguno de los ámbitos de trabajo de la organización y que han adquirido su profesionalización en el desarrollo de sus actividades con GM. También colabora con diferentes agencias internacionales que coinciden sobre el terreno en las áreas de trabajo de GM.

Ha establecido convenios y colaboraciones con diferentes universidades, tanto españolas (UPC, UB, UCM, UPM...) como centroamericanas (UES, UCA, San Carlos de Guatemala, UNAM...). Esta colaboración ha resultado en la realización de diferentes trabajos de graduación y tesis de especialización basadas en las investigaciones llevadas a cabo en los proyectos de GM.

La relación con otros profesionales de diferentes agencias y organizaciones de cooperación ha sido abundante y fructífera, ya sea con ONG del Norte, SI, ACH, MPDL,

Médicos del Mundo, Medicus Mundi, Ingenieros Sin Fronteras, Arquitectos Sin Fronteras, como con ONG de los países de intervención, CEPRODE, REDES, Funsalporde, ASIDE, Promesa, ADEL Morazán, ASACMA, etc.

Las características de los proyectos de desarrollo realizados o en curso, ha llevado a GM a establecer convenios de colaboración con instituciones gubernamentales, locales o nacionales, y al establecimiento de coordinación con los técnicos de dichas instituciones pero también con sus responsables superiores, a menudo, de carácter político, por lo que se ha debido trabajar una esmerada estrategia de imparcialidad política y claridad técnica.

¿Geóloga o profesora?

Leonor Carrillo Vigil

Catedrática de Geología-Biología

I.E.S. Pablo Gargallo. Zaragoza

Premio Nacional de Innovación Educativa

¿Cómo atrapa una geóloga el virus de la Enseñanza Secundaria? Mientras estudiaba la carrera ni por un momento contemplaba la posibilidad de dedicarme a la docencia. Quería trabajar como geóloga en una empresa y ya de estudiante preparé esta posibilidad prospectando oro en verano, para la Riotinto Patiño. Después, circunstancias personales y una gran afición por la montaña y los viajes me llevaron a aceptar una oferta de empleo como profesora en un instituto de Bachillerato de Teruel. Así encontré la fórmula maravillosa para conciliar familia, trabajo y vacaciones. Allí nació, hace 30 años, una pasión por la



Figura 1. Visitar montañas, volcanes y desiertos es mucho más satisfactorio cuando sabes identificar la flor que crece en la grieta o en la pradera (Pirineo, junio 2006).

nueva profesión que aún no me ha abandonado. Desde entonces ni un solo día he sido víctima de la rutina pues la libertad de cátedra me ha permitido innovar en cada clase y el continuo contacto con gente joven ha mantenido mi espíritu cercano al de ellos.

Durante este tiempo he tenido que completar un variado itinerario profesional a fin de asegurar mi puesto de trabajo (aprobar las oposiciones) y hacerlo con competencia (aprender a enseñar con calidad), procurando siempre la actualización científica (mediante cursos o proyectos de colaboración con la universidad en programas de I+D y proyectos de innovación e investigación educativa, el reconocimiento profesional (carrera docente) y la satisfacción de disfrutar con todo ello.

De esta manera me convertí más en una naturalista que en una especialista en geología, en una privilegiada que cobra por aprender, sorprender, motivar, informar, generar gusto por la ciencia, fomentar el espíritu crítico y desarrollar capacidades diversas en chicos y chicas, entre 12 y 18 años, cuyo futuro está por definir. Algunos serán simples ciudadanos (padres o madres de familia, dedicados a profesiones u oficios diversos) cuya formación científico-naturalista será la adquirida en estos años. A algunos los habré orientado profesionalmente y, junto con otros de mis compañeros, los habremos preparado para la universidad. E incluso, a varios, les habré transmitido el gusanillo de la geología que, hace años, afortunadamente, me contagiaron a mí.

Para ello he tenido que formarme en Biología (Botánica, Genética, Bioquímica, Ecología...), Astronomía y áreas transversales del curriculum (Educación Ambiental, Educación para la Salud y el Consumo...) y, simultáneamente, aprender Psicología del Adolescente, Dinámica de Grupos, Diseño Curricular, etc. Pero mi verdadera especialidad es la Didáctica de la Geología, una herramienta destinada a producir un cambio en el aprendizaje y el aprecio de esta materia tanto por los estudiantes de enseñanzas medias como por el profesorado que acude a los cursos de formación, o a través de diversas publicaciones (libros de texto, artículos para revistas especializadas, etc.). Más allá de la palabra hablada o escrita, como elemento fundamental de transmisión, el objetivo de la didáctica es presentar objetos o fenómenos mediante una metodología capaz de producir una diferencia entre el antes y el después de presentar un conocimiento.

Como consecuencia de los cambios sociales y políticos que afectan al mundo globalizado, la estructura de la Enseñanza Secundaria que introdujo la LOGSE (Ley Orgánica General del Sistema Educativo de 1990) sufrió un cambio drástico que afectó de lleno a la enseñanza de la Geología que, desde entonces, ha visto progresivamente mermada su presencia en los curricula tanto de la ESO (Educación Secundaria Obligatoria) como del Bachillerato, donde hoy es testimonial. Paralelamente se ha ido produciendo la pérdida de importancia de la didáctica de esta disciplina y se han ido imponiendo otras prioridades que exigen del

profesorado nuevas competencias profesionales, menos ligadas a la formación original y más relacionadas con la educación de las personas en valores: convivencia, resolución de conflictos en el aula, tutorías, educación intercultural, Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), etc.¹.

Aun reconociendo la importancia que en el desempeño de nuestra profesión tienen los aspectos citados, quiero llamar la atención sobre las consecuencias de la deficiente formación científica en los últimos años que se ha visto reflejada en el informe PISA 2003². Y en este sentido emular el empeño de un número significativo de docentes, desde la escuela a la universidad, que se interesan por la didáctica de las diferentes disciplinas que conforman las Ciencias de la Naturaleza. Todos ellos, personalmente, o a través de asociaciones profesionales como el ICOG, el COB (Colegio Oficial de Biólogos), la AEPECT (Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra) o de las instituciones potenciadas por el propio MEC y D o las CC AA como los CPR (Centros de Profesores y Recursos, etc.) participamos e interactuamos en cursos, simposios u otras actividades (publicaciones, etc.) intercambiando materiales, conocimientos y experiencias a fin de promover aprendizajes significativos cuyos objetivos últimos son: formar al alumnado, orientarlo en sus estudios posteriores y prepararlo para abordar dichos estudios con éxito.

A continuación haré hincapié en la concreción de dichas finalidades en lo que respecta a la enseñanza de la geología, si bien en mi trabajo diario persigo su consecución a través de



Figura 2. Estudiando el ecosistema fluvial del Ebro con estudiantes de 4º de ESO y 2º de Bachillerato (octubre 2005).

1. En los tres últimos años la realidad nos desborda: en mi centro, el 20 por ciento de los estudiantes son extranjeros, de los que un tercio (35) no sabe español y sólo reciben cinco horas a la semana de clases de inmersión lingüística, permaneciendo el resto del tiempo en sus aulas de referencia.

2. ¿Acaso como consecuencia del famoso “Decreto de Humanidades” RD 29-XII-2000? ¿de la disminución de recursos destinados a desdobles para prácticas de laboratorio? ¿o el miedo a la responsabilidad civil que conllevan las salidas de campo?



Figura 3. Trabajando en el laboratorio con un estereoscopio de fabricación escolar.

cualquiera de los contenidos prescriptivos —propios de las Ciencias de la Naturaleza— que imparto. Éstas son:

- ▶ Facilitar la comprensión de conceptos relevantes para comprender el mundo que nos rodea: el tiempo geológico, la historia de nuestro planeta tan ligada al origen y evolución de la vida, los cambios y ritmos del planeta íntimamente ligados a los recursos y a la dinámica que origina los riesgos geológicos, etc.
- ▶ Potenciar capacidades científicas transferibles a cualquier otro campo del conocimiento (observar, describir, analizar textos, interpretar mapas, utilizar instrumentos de laboratorio, visión espacial, cambios de escala desde lo atómico a lo cósmico, etc.).
- ▶ Familiarizarles con el patrimonio geológico más próximo a su entorno.
- ▶ Fomentar actitudes de respeto hacia el medio ambiente, de curiosidad e indagación, rigor, honestidad, respeto de las ideas y condiciones de sus compañeros, trabajo en equipo, etc.

Para la consecución de estos objetivos nos valemos de estrategias diversas como partir de lo particular, la geología de la vida cotidiana, para comprender los principios geológicos y los procesos tecnológicos por los que un material ha llegado a su entorno: los granos de arena de una playa, las losas ornamentales que recubren el portal de su casa, de qué están hechos los objetos que nos rodean (materiales de la clase, objetos de uso personal desde el bolígrafo al móvil, etc.) y su relación con el origen y explotación de los recursos naturales

y el deterioro ambiental. Personalmente me parece muy potente la idea de que “las rocas son los archivos de la Tierra” y que la tarea de los geólogos y geólogas consiste en interpretar los mensajes que contienen y que ellos pueden aprender a leer en las rocas. Aprovecho la existencia de las famosas series de detectives CSI o Expediente X, que ven con asiduidad, para motivarlos y convencerlos de que para comprender es necesario saber (teoría), desarrollar destrezas instrumentales (análisis, medidas, uso de microscopio, etc.) e intelectuales (observación, emisión y contrastación de hipótesis, etc.), así como actitudes científicas (rigor en la toma y comunicación de datos, pulcritud...), tesón en el trabajo, etc.

Quiero terminar expresando la gran satisfacción personal que produce reconocer en los alumnos y alumnas a los hombres y mujeres del futuro, a los que podemos ayudar a crecer, inmaduros por edad, inseguros porque se enfrentan a un mundo complejo, jóvenes, adolescentes intentando comprenderse a sí mismos e integrarse en una sociedad poco acogedora en principio. Mirarlos no desde lo que soy, sino desde lo que ellos son y pueden llegar a ser. Cuando al final de la Secundaria comienzan a andar solos y se dirigen hacia la universidad, los módulos profesionales o el mundo del trabajo, llega el momento de despedirse y de hacerles el último favor: saber desaparecer y estar allí por si vuelven; ser conscientes de que nuestro esfuerzo —aunque no pueda medirse— es importante, y de que cada promoción, “como las mareas que llegan a la playa y luego se retiran, arrastran y mueven las arenas de nuestras ideas. Se llevan de nosotros valores y pensamientos que van a considerar como suyos, y así cumplimos con el papel de intermediarios entre el esfuerzo



Figura 4. Además de la geología, los estudiantes observan las grullas en la laguna de Gallocanta (febrero 2006).

humano de muchos siglos de cultura y ese grupo de jóvenes diversos que desde los pupitres nos miran esperando todo y nada” (M. Esteve) con su mochila cargada de ilusiones, miedos o esperanzas. Ésta no es, aparentemente, una de las facetas socialmente relevantes del profesional de la geología, pero puedo compartir con ellos su curiosidad, su búsqueda de la verdad y sus balbuceos en el inicio de la ciencia o de la simple ciudadanía.

Referencias bibliográficas

Carrillo, L. (2005). Enseñanza Secundaria: Actividades prácticas y aprendizaje de la Geología/ CC. de la Tierra. *Tierra y Tecnología* 26: 51-64.

Carrillo, L. y Gisbert, J. (1993). Autoorganización del aprendizaje de la geología en la Universidad de Zaragoza. Repercusiones en la comunidad educativa aragonesa. Primer Premio Nacional de Innovación Educativa 1992. CIDE (MEC), Madrid, 267-308.

PISA 2003. Aprender para el mundo de mañana. Resumen de resultados. (www.pisa.oecd.org)

El geólogo planetario o astrogeólogo

Jesús Martínez Frías
Centro de Astrobiología (CSIC/INTA),
asociado al NASA Astrobiology Institute

Introducción

Los estudios geológicos relacionados con la exploración planetaria cubren numerosos aspectos y no pueden entenderse actualmente sin considerar su carácter inter y transdisciplinar (Martínez Frías, 2006). La geología planetaria se encuentra en pleno desarrollo en los países avanzados y en España va ocupando, aunque aún lentamente, mayores espacios, tanto en ámbitos científicos como docentes. En este artículo se analiza la situación actual del tema y se detallan los principales aspectos relacionados con las investigaciones actualmente en desarrollo. Básicamente, esta contribución pretende ser la síntesis de dos interesantes iniciativas recientes, promovidas casi en paralelo: la solicitud por parte del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG) de una contribución específica sobre "El geólogo planetario o astrogeólogo" y la mesa redonda con título "La geología en la exploración planetaria" (Martínez Frías et al., 2008) que, en el contexto de la Sesión de Planetología, Impactos y Eventos de Extinción, se celebró en el marco del VII Congreso Geológico de España, celebrado en Gran Canaria.

Geología planetaria o astrogeología

Al igual que existen los astrofísicos, astroquímicos o astrobiólogos, los geólogos planetarios también se han denominado, y de hecho lo siguen haciendo, astrogeólogos. El propio Servicio Geológico de Estados Unidos dispone de un programa específico de investigación en astrogeología USGS Astrogeology Research Program (USGS, 2008) que lleva años funcionando. Aunque no existe una definición concreta y estandarizada de la

astrogeología o geología planetaria, una de las mejores corresponde a la utilizada por la Arizona State University: una institución emblemática y pionera en esta línea de investigación (ASU, 2006). La geología planetaria puede definirse como “el estudio a distintas escalas del origen, evolución y distribución de la materia condensada en el universo en forma de planetas, satélites, cometas, asteroides y partículas de distintas dimensiones y génesis. Esto conlleva la incorporación y estudio pormenorizado de datos procedentes de sondas espaciales, análisis comparados de meteoritos y polvo cósmico, estructuras y eventos de impacto meteorítico, simulaciones de laboratorio de varios procesos planetarios y también estudios de campo sobre análogos terrestres útiles para la exploración y modelización de los mecanismos y procesos geológicos que tienen lugar más allá de las fronteras de nuestro planeta”. Siendo amplia, esta definición no caracteriza en su totalidad el trabajo que realizan los geólogos planetarios. Estos científicos, al igual que los geólogos que desarrollan su actividad profesional sobre temas terrestres más clásicos, se nutren también de la física, química, biología y otras disciplinas en un mestizaje científico-técnico que, además de enriquecer el área de las ciencias de la Tierra y del espacio, es una base fundamental para la evolución del conocimiento en su sentido más amplio. Además de los avances científico-tecnológicos inherentes al desarrollo de la exploración espacial en sí misma (nanotecnología, ingeniería, nuevos materiales y sistemas de comunicaciones, etc.), el procesamiento de la ingente cantidad de datos geológicos recibidos de otros planetas y satélites requiere frecuentemente el uso de software de computación avanzada, muy útil, por ejemplo, para el procesamiento de imágenes. Probablemente, una de las iniciativas más exitosas que se viene utilizando es la denominada ISIS (Integrated Software for Imagers and Spectrometers). ISIS es el resultado de 30 años de investigación astrogeológica que permite el manejo de imágenes procedentes de misiones planetarias a Marte, Júpiter, Saturno y otros cuerpos planetarios del sistema solar.

Es importante tener en cuenta que la geología planetaria constituye un ámbito temático específico reconocido oficialmente en el contexto internacional de campos, disciplinas y subdisciplinas científicas de la UNESCO (código UNESCO: 2104.04), cuya revisión, reorganización y actualización se ha propuesto recientemente (Martínez Frías y Hochberg, 2007). De acuerdo con estos autores, dado que la mayor parte de los estudios y tópicos de investigación sobre geología planetaria involucran principalmente a geólogos, es decir, caen dentro del campo 25 de la UNESCO “Earth and Space Sciences”, se ha sugerido que sería muy apropiado asignar un nuevo código adicional UNESCO (2512.04) para la geología planetaria (con referencias cruzadas entre ambos: 2104.04 y 2512.04). Ello permitiría disponer de una clasificación más ajustada a la situación real de la profesión y coherente con las investigaciones que, sobre esta temática, realiza nuestro colectivo. Esta propuesta cuenta, hasta el momento, con el respaldo del ICOG y de la Federación Europea de Geólogos.

Todos estos aspectos deben ser tenidos en cuenta para entender el contexto general en que se enmarcan los distintos estudios del profesional que tiene como línea de trabajo la astrogeología o geología planetaria. Los temas e investigaciones que se han venido realizando en el laboratorio de geología planetaria del Centro de Astrobiología (llamado así desde la fundación del Centro hasta julio de 2008, fecha en que cambió su denominación a laboratorio de planetología), y su vinculación interdisciplinar con otras áreas científicas, pueden ser un buen ejemplo de ello. Éstos incluyen actividades relacionadas principalmente con:

- ▶ Estudios de materia extraterrestre, principalmente meteoritos.
- ▶ Investigación de cráteres y eventos de impacto meteorítico.
- ▶ Caracterización geológica, mineralógica, geoquímica y metalogenética de análogos terrestres para la exploración de Marte, Europa, Titán y otros cuerpos planetarios de nuestro sistema solar.
- ▶ Simulaciones en laboratorio utilizando cámaras planetarias. Una buena parte de estos trabajos se realiza con participación directa de los geólogos planetarios en misiones espaciales, que en la actualidad están principalmente centradas sobre Marte y el estudio de los cuerpos planetarios helados del sistema solar (ej. misiones ESA-ExoMars, NASA-Mars Science Laboratory-REMS, Laplace, Tandem).

Estudios de materia extraterrestre: meteoritos

El Museo Nacional de Ciencias Naturales cuenta con la colección de meteoritos más importante de España (más de 150 ejemplares entre lititos, sideritos y siderolitos, Muñoz Espadas et al., 2002). Sin embargo, ha sido el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha (Cuenca) el que ha sido sede de los dos eventos más relevantes relacionados con esta temática:

- ▶ El Congreso Ibérico de Meteoritos y Geología planetaria, celebrado en octubre de 2002, co-patrocinado por el ICOG (Martínez-Frías, 2002).
- ▶ El primer Seminario Científico de Astromineralogía y Mineralogía Espacial, organizado en 2004 en el marco de la XXIV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía (SEM, 2004). Si el congreso sirvió para fomentar la coordinación y colaboración entre científicos relacionados con esta temática (Martínez-Frías y Madero, 2005), el seminario fue extremadamente útil desde el punto de vista conceptual describiendo, entre otras cuestiones, las principales fuentes y tipos de materia en el sistema solar (principalmente IDP —partículas de polvo interplanetario— y meteoritos) (Martínez-Frías et al., 2004a).

Cuando, desde la geología planetaria, se trabaja con distintos tipos de materia extraterrestre es muy importante, al igual que en otras disciplinas, la terminología utilizada en

cada caso. La definición de astrominerales se aplica a aquellos materiales de origen pre-solar que se encuentran en materiales meteoríticos primitivos que ya existían antes del colapso de la nebulosa solar. Estos materiales pueden preservar granos circunestelares, granos formados en explosiones de supernovas y granos formados o modificados dentro del medio interestelar (incluyendo granos que estaban presentes en la nube molecular presolar). Los astrominerales también pueden encontrarse en meteoritos químicamente primitivos (ej. condritas carbonáceas), micrometeoritos polares y partículas de polvo interplanetario (IDP) (Bradley, 2003). El término mineralogía espacial es mucho más amplio (y también se ha utilizado de manera más ambigua) refiriéndose normalmente a la mineralogía común de los meteoritos —sin esta connotación temporal primigenia— y a minerales identificados en otros planetas (ej. hematites y jarosita de Marte, etc.) o minerales lunares. Los trabajos que se realizan habitualmente sobre astrominerales presentes en IDP incluyen estudios de:

- ▶ Materia orgánica, siendo el carbono predominantemente amorfo y parcialmente grafito.
- ▶ Nano-diamantes: que constituyen el tipo más abundante de granos presolares en meteoritos condriticos, con un tamaño de entre 1 a 10 nm de diámetro.
- ▶ Otros granos presolares presentes en meteoritos muy primitivos: diamantes, carburo de silicio, grafito, corindón y nitruro de silicio.
- ▶ Silicatos, principalmente forsterita y enstatita y silicatos vítreos conocidos como GEMS (glass with embedded metal and sulfides).
- ▶ Sulfuros de Fe-Ni, principalmente pirrotina pobre en Ni, pentlandita, troilita, y esfalerita. Recientemente se ha descubierto un sulfuro de Fe-Ni con estructura cúbica de tipo espinela, con una composición similar a las de la pirrotina y pentlandita, aparentemente cercana a la pirrotina hexagonal.

Pero si el trabajo que tienen que realizar los geólogos planetarios sobre IDP es importante, sobre todo en colaboración con investigaciones complementarias en astrofísica, astroquímica y espectroscopia (Jenniskens et al., 2003), los relacionados con meteoritos son los que, sin duda, han caracterizado los estudios de materia extraterrestre a lo largo de estos últimos 200 años de estudio de meteoritos. Antes de abordar su tipología y clasificación, parece procedente comentar algunos aspectos históricos y de procedimientos de trabajo en su investigación.

Los meteoritos son fragmentos de asteroides y planetas que viajan por el espacio y chocan contra la superficie de la Tierra o de otro cuerpo planetario, donde son recogidos. De todos los tipos de materia extraterrestre que nos llega del espacio, los meteoritos stricto sensu son, sin duda, los más importantes y los que nos proporcionan una información mineralógica más representativa, a escala espacial y temporal, de

los procesos ocurridos en el sistema solar. A fecha de diciembre 2000 se ha observado caer unos 1.000 meteoritos (Grady, 2000), aunque esto sólo representa una pequeña fracción de los objetos que nos llegan, la mayoría de los cuales se precipitan a los océanos o en áreas despobladas. Al contrario, se han encontrado más de 20.000 meteoritos, muchos de ellos a partir de 1969, cuando se descubrió que éstos se acumulan y conservan en cantidad en las superficies heladas de la Antártida, y en desiertos como el de Atacama o los del norte de África. Sin embargo, apenas se recupera un uno por ciento de las toneladas de material extraterrestre que alcanzan la superficie de la Tierra cada día. Los trabajos que se realizan sobre meteoritos conllevan su caracterización detallada y clasificación (Muñoz-Espadas et al., 2002, Martínez Frías y Lunar, 2008). Ésta es una labor que habitualmente el especialista en geología planetaria debe ser capaz de realizar en toda su complejidad. A veces, la clasificación de un meteorito no es sencilla. La mayoría de los meteoros que se observan en la atmósfera (incluso cuando alcanzan la magnitud de fireball: bola de fuego), no llegan a impactar en forma de meteoritos. Por ello, es importante que exista una supervisión y asesoramiento científico de los geólogos especialistas en estos temas, sobre todo en eventos con repercusión social a los que se pueden asignar errores conceptuales importantes, tales como, por ejemplo, los que relacionan de manera directa meteoritos e incendios. El meteorito está prácticamente frío cuando impacta contra el suelo y no se conocen casos, hasta el momento, de meteoritos que nada más caer no puedan mantenerse entre las manos (Martínez-Frías y Madero, 2004). En todos los estudios sobre meteoritos es esencial para el geólogo planetario determinar, en primer lugar, si se trata de una "caída", con evidencias de impacto o delante de testigos o si, por el contrario, el ejemplar meteorítico simplemente se ha encontrado, lo que se conoce como un "hallazgo". Los últimos cálculos basados en los registros históricos y observaciones, indican que alrededor de 500 meteoritos mayores de 0,5 kilos caen a la Tierra cada año, aunque solamente cuatro son observados. Desde el punto de vista histórico es importante considerar que las caídas coincidentes con la observación simultánea de bólidos son escasísimas y pueden contarse prácticamente con los dedos de las manos en toda la historia de los meteoritos. Cualquier intento de establecer una hipotética relación entre un hallazgo (meteorito encontrado) y el avistamiento de un evento de tipo bólido, bola de fuego o cualquier lluvia de fragmentos determinada, implica que existan sólidos fundamentos científicos para la determinación previa de su "edad terrestre" (tiempo que ha pasado desde que el meteorito cayó a la Tierra), mediante la utilización de dataciones isotópicas u otros métodos (p. ej. termoluminiscencia). Solamente de esta manera se podrá plantear la posible conexión entre un bólido y un hallazgo meteorítico a posteriori, "pero siempre en la categoría de hipótesis científica y no como hecho o dato de confirmación", pues los meteoritos están cayendo continuamente sobre la Tierra y el hallazgo del supuesto ejemplar podría estar relacionado (o no) con dicho bólido. Actuando de acuerdo con este procedimiento científico, se evitarán asignaciones erróneas (o inducidas de manera

fraudulenta), de supuestos hallazgos meteoríticos con determinados avistamientos multitudinarios de bólidos. Desafortunadamente esto podría suceder, propiciado por algunos coleccionistas y traficantes de meteoritos que insinuarían interesadamente que determinados fragmentos se corresponden con un determinado bólido que ha tenido repercusión mediática (incluso nada más encontrarlos y sin hacer ningún estudio previo), para así incrementar el valor crematístico de las piezas y que museos u otras instituciones se interesen por ellos y los adquieran (Martínez Frías et al., 2004a; Martínez Frías, 2008). En este sentido, es muy importante desarrollar, con sólidos fundamentos científicos, la reglamentación correspondiente a la Ley Orgánica 16/2007 del 13 de diciembre, ya que en su Artículo 3 epígrafe 38, incluye por primera vez a los meteoritos como patrimonio geológico (propuesta que fue avanzada en 1998 por el autor del presente artículo en una visita al Senado) (Martínez-Frías et al., 2009).



Figura 1. Sección del meteorito condritico NWA2892, 20x10 cm (foto: cortesía de Meteorites Australia).

Entrando ya en su tipología, aunque de manera muy sucinta, existen tres categorías básicas de meteoritos atendiendo a su contenido en dos tipos de materiales (hierro-níquel metálico y silicatos): sideritos (Irons), prácticamente el cien por cien de metal, siderolitos (Stony irons), casi iguales proporciones de metal y silicatos, y lititos o aerolitos (Stony), principalmente silicatos. Estos últimos comprenden a su vez dos subgrupos importantes: condritas y acondritas. Las condritas

(figura 1) son, con mucho, las más numerosas y probablemente también las más importantes por muchas razones distintas (incluso de tipo astrobiológico). Las condritas se dividen en cuatro clases con 13 grupos, según su composición química: condritas enstatíticas (E: EH y EL), condritas carbonáceas (C: CI, CM, CO, CV, CR, CK, CH y CB), condritas ordinarias (O: H, L y LL) y condritas Rumuruti (R). Estas últimas son una clase definida recientemente, al encontrarse cinco meteoritos de las mismas características, número mínimo necesario para nombrar una nueva clase (McSween, 1999; Bischoff, 2001a, b). Una clase adicional, las condritas Kakangari (K) no está aún reconocida por todos los autores (Weisberg et al., 1996). Las acondritas son lititos sin cóndrulos. De acuerdo con Bischoff (2001a y b), las acondritas incluyen:

- ▶ Las denominadas acondritas primitivas: acapulcoitas, winonaitas y lodranitas.
- ▶ Aunque constituyen un grupo independizado, con entidad propia, los meteoritos SNC a los que se ha asignado un origen marciano (shergottitas, anclitas y chassignitas y ALH84001).
- ▶ Aubritas, ureilitas, angritas y las HED (howarditas, eucritas, diogenitas).
- ▶ También como un grupo con entidad propia, las lunaitas (meteoritos lunares).

Los siderolitos se encuadran normalmente en pallasitos y mesosideritos. Por último, los sideritos se consideran derivados de una gran variedad de cuerpos padre y se han identificado unos 60 grupos sobre la base de sus características geoquímicas, estimaciones de la pauta de enfriamiento y edades de exposición. Básicamente, se clasifican en hexaedritas, octaedritas y ataxitas (fundamentalmente aleaciones de Fe-Ni, en forma de mamacita y taenita. A todos ellos hay que añadir los meteoritos planetarios (de Marte y la Luna) que han alcanzado también nuestro planeta y que sería prolijo abordar aquí.

A esta complejidad tipológica hay que sumar que no es la primera vez que, entre los propios especímenes extraterrestres, determinados ejemplares han tenido que ser reclasificados (algunos meteoritos marcianos son claros ejemplos de ellos). Además, existen determinados materiales, a los que se denomina en una terminología no-oficial pseudometeoritos, que en ocasiones plantean serias dificultades. En 1994 cayó un supuesto meteorito en la zona de Getafe. Su estudio indicó que, aunque las circunstancias de su caída están bien documentadas (impactó en trayectoria descendente/bajo ángulo contra un automóvil en marcha hiriendo en la mano al conductor), sus características petrológicas y geoquímicas no coinciden con las de ningún meteorito previamente clasificado (básicamente es una roca ultrarrefractaria rica en larnita). Por ello se clasificó por nuestro equipo de investigación como pseudometeorito (Muñoz-Espadas et al., 2002) y ha sido objeto de un informe especial de la Meteoritical Society en el que, específicamente, se citan como referencia internacional nuestros trabajos (ver, entre otros, Martínez-Frías et al., 1999, Martínez-Frías et al., 2004 a y b, www.meteoriticalsociety.org/ y <http://tierra.rediris.es/merge/getafe.html>). En relación con el pseudometeorito de Getafe, también es importante destacar la investigación sobre la roca ultrarrefractaria de Granada (Colorado, EE UU), llevada a cabo por investigadores del departamento de Geociencias de Fort Hays State University (Hays, Kansas). Recientemente, la colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales ha sido objeto de un artículo recopilatorio de la información existente sobre meteoritos (García Guinea et al., 2006) y ha recibido dos entradas de ejemplares (una condrita L6: Villalbeto de la Peña y una eucrita-br: Puerto Lápice) correspondientes a hallazgos meteoríticos que se han relacionado con los bólidos del 4 de enero de 2004 y del 10 de mayo de 2007 (Llorca et al., 2005, Madiedo et al., 2008). Los primeros fragmentos de Villalbeto de la Peña se encontraron siete días después del avistamiento del bólido de 2004 y los de Puerto Lápice 24 días después del bólido de 2007. Posteriormente se encontraron otros fragmentos, que también se asignaron a dichos bólidos (ver <http://tin.er.usgs.gov/meteor/>).

En general, en España los estudios específicos sobre meteoritos son desafortunadamente aún muy escasos, con contadas excepciones, como en el Centro de Astrobiología, las universidades Complutense de Madrid y de Barcelona, el Museo

Nacional de Ciencias Naturales de Madrid y el de Ciencias Naturales de Tenerife. Por poner ejemplos directos del trabajo que se realiza sobre estos temas, éstos incluyen:

- ▶ Estudios generales de clasificación de meteoritos.
- ▶ Estudios mineralógicos, cristaloquímicos y espectroscópicos de IDP y partículas de polvo interestelar.
- ▶ Caracterización de condritas carbonáceas y ordinarias y mesosideritos, aplicando técnicas mineralógicas y geoquímicas clásicas y de espectroscopia Raman e IR.
- ▶ Estudios de la interacción de determinadas bacterias con meteoritos (fundamentalmente sideríticos).
- ▶ Análisis comparativo de la influencia de la radiación UV en meteoritos y determinadas rocas primitivas terrestres (komatiitas).

Investigación de cráteres y eventos de impacto meteorítico

Los impactos meteoríticos constituyen, probablemente, los episodios geológicos más extendidos en el sistema solar y su estudio desde la geología planetaria tiene multitud de implicaciones relacionadas con aspectos muy diversos, desde los propios procesos de acreción planetaria a la búsqueda de vida en Marte (figura 2) (Martínez-Frías y Ormö, 2005). Las colisiones contra la Tierra han jugado un papel geológico muy relevante en el modelado de la evolución planetaria. Unos pocos ejemplos (Martínez-Frías y Chicarro, 2005): el calor generado por los impactos se supone que contribuyó a la desgasificación y deshidratación de la temprana corteza terrestre rica en volátiles, favoreciendo así la formación de las primitivas atmósfera e hidrosfera; grandes impactos pueden haber participado en la ruptura de determinadas áreas corticales, contribuyendo a la apertura de las zonas de rifts oceánicos y posiblemente a la formación de corteza continental anómala como es el caso de Islandia; los anillos y las zonas elevadas centrales de varias estructuras de impacto en depósitos sedimentarios han servido de reservorios de petróleo y gas susceptibles de ser explotados y también de grandes mineralizaciones de cobre-níquel como la cuenca de Sudbury en Canadá, que están relacionados con el gigantesco impacto que tuvo lugar en el Precámbrico; los impactos en la primitiva Tierra, particularmente por cometas, pueden haber aportado los compuestos orgánicos necesarios para el comienzo y evolución de la vida; un número importante de extinciones de plantas y animales a través de toda la historia geológica de nuestro planeta están ligadas a efectos globales resultantes, entre otras causas, de grandes impactos meteoríticos. Los cráteres también son indicadores de la "energía" de un cuerpo planetario. Así la Luna, sin actividad geológica, no dispone de energía suficiente para remodelar su superficie por lo que permanece intensamente craterizada. Por el contrario, nuestro planeta ha sido capaz, gracias a la actividad geodinámica interna y externa, de modificar sus rasgos corticales, por lo que muchísimas estructuras colisionares han desaparecido.

Gusev Crater Site (TCM-5 DeltaDOR, -2Day:
MER-A; Open of window=dashed, Close=solid)

T.J. Parker, A. Watson, F. S. Anderson, JPL

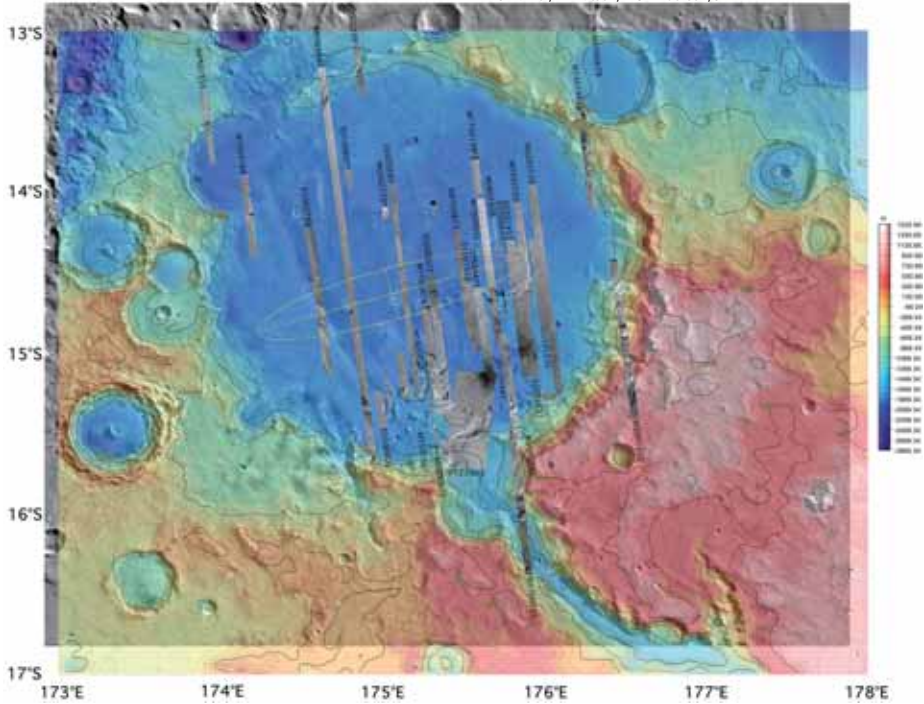


Figura 2. Mapa del cráter Gusev. Se trata de un cráter de impacto meteorítico en Marte con un diámetro de aproximadamente 150 km. Obsérvese la zona de amortizaje del Spirit (foto: cortesía NASA).

MER-A Spirit APXS X-Ray

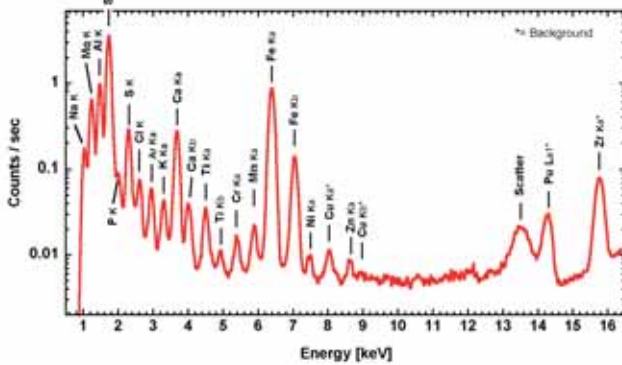


Figura 3. Análisis geoquímico del suelo marciano obtenido por el robot Spirit (NASA-Mars Exploration Rover) (foto: cortesía NASA).

Por último, decir que algunos cráteres (de impacto) en Marte (p. ej. cráter Gusev, figuras 2 y 3) constituyen zonas privilegiadas de exploración geológica y astrobiológica. No es casualidad que el robot Spirit haya “amartizado” precisamente en esta zona.

Los estudios de geología planetaria sobre este tipo de eventos, a veces con consecuencias catastróficas, deben tener en cuenta su componente temporal en el registro geológico. Nuestro planeta está en interacción constante con el espacio exterior, y la frecuencia con que los meteoritos alcanzan nuestro planeta decrece (afortunadamente) según aumenta el tamaño de los “impactores”. Se ha estimado que, por término medio, una vez cada pocos cientos de años la Tierra es alcanzada por un objeto de unos 70 metros de diámetro; cada diez mil años nos golpea un objeto de unos 200 metros y cada millón de años se produce el impacto de un cuerpo de más de 2 kilómetros de diámetro. Por último, cada 100 Ma tiene lugar una catástrofe como la que sucedió, en el límite K-T, cuando se produjo el choque de un cuerpo de unos 10 kilómetros de diámetro o más contra nuestro planeta, al que se ha responsabilizado de la gigantesca estructura de impacto de Chicxulub, en el Golfo de México. En la actualidad, se han identificado, de acuerdo con Spray y Heines (2006) alrededor de 170 estructuras de impacto (Spray y Heines, 2006), con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros. En España no existen estructuras confirmadas de impacto (Cortes et al., 2002; Spray y Heines, 2006) y hasta el momento, la única capa del registro sedimentario de España para la cual se ha demostrado de forma inequívoca su relación con un impacto meteorítico es la capa de arcilla del límite Cretácico-Terciario (Díaz et al., 2002). El mayor meteorito caído en España, del que se tiene referencias, es el de Molina de Segura (Murcia), con un peso original estimado de 144 kilos. Su espectacular impacto el 24 de diciembre de 1858 (a las 14:45) pudo seguirse detalladamente, gracias a la extraordinaria documentación que se conserva en el archivo del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, considerándose uno de los ejemplares españoles de mayor interés histórico (Martínez Frías y Lunar, 2008).

Desde enero de 2000 en que España se incorporó al programa IMPACT de la European Science Foundation, en el laboratorio de geología planetaria se vienen realizando estudios de todo este tipo de eventos de impacto que cubren aspectos de campo y laboratorio. Es importante indicar que, en nuestro país, geólogos fundamentalmente de la Universidad Complutense de Madrid, CSIC-Universidad de Granada, Universidad de Zaragoza y Museo de Ciencias Naturales de Tenerife ya habían abordado (y lo siguen haciendo) (Hernández Fernández et al., 2008), con excelentes resultados, el estudio de estos eventos, fundamentalmente desde el punto de vista geológico, geoquímico y paleontológico. Nuestros trabajos se iniciaron con la realización de un primer estudio sobre el registro de eventos de impacto en la península ibérica, enfocado específicamente en la investigación de la controvertida estructura de Azuara, y de una revisión detallada sobre las huellas geoquímicas de impacto en rocas terrestres (Díaz et al., 2002, Cortés et al., 2002, Muñoz-Espadas et al., 2003). Actualmente se centran en:

- ▶ La investigación geológica de determinadas estructuras inequívocas de impacto (Lockne, Acraman) (Ormo et al., 2004, Hill, 2004).

- ▶ El estudio de fases de alta presión mediante técnicas mineralógicas clásicas y espectroscopia Raman (Rull et al., 2006).
- ▶ La investigación sedimentológica y geoquímica del límite K/T en facies de plataforma marina somera del área de Cantabria (Ayllón et al., 2004).
- ▶ Estudios de simulación de laboratorio de impactos controlados (Ormö et al., 2004, 2005, 2006).
- ▶ Estudio comparado de estructuras confirmadas y no confirmadas de impacto como análogos terrestres para la exploración de Marte (Martínez Frías et al., 2008).

Análogos terrestres y exploración planetaria

A pesar de la ingente cantidad de datos geomorfológicos y geofísicos obtenidos gracias a las misiones espaciales, existe aún una gran ambigüedad en la interpretación de ciertos rasgos geológicos de sus superficies. De aquí la importancia de disponer de modelos terrestres (geología, geoquímica, mineralogía, metalogenia, etc.), basados en el conocimiento de los procesos desarrollados en nuestro planeta, que nos permitan extrapolar su funcionamiento a otros cuerpos planetarios. Por ello, la geología terrestre tiene muchas de las claves para la exploración de otros mundos y el estudio de los denominados "análogos terrestres" está siendo fundamental, por ejemplo, para la exploración de Marte o Europa, como también lo está siendo la utilización de cámaras de simulación planetaria.

Todo indica, sobre todo tras los últimos resultados de las misiones MER, Mars Express y Phoenix, que en Marte es extremadamente importante, tanto para la interpretación de

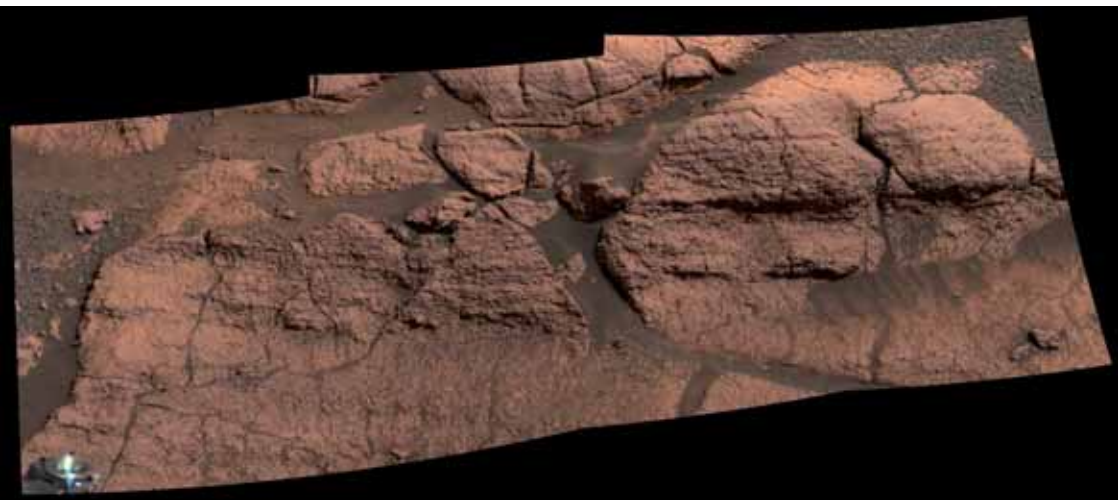


Figura 4. Mosaico de imágenes tomado por la cámara del Mars Exploration Rover-Opportunity correspondiente al afloramiento marciano de "El Capitán", donde se detectó la presencia de jarosita (foto: cortesía NASA).

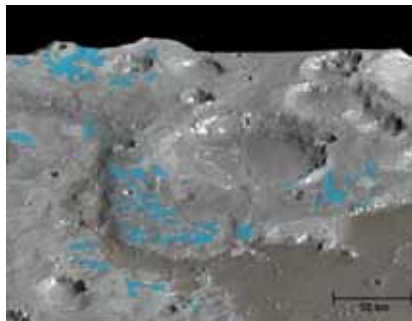


Figura 5. Imagen OMEGA en falso color de la zona de Marwth Vallis, donde se han cartografiado (en azul) los minerales ricos en agua (foto: cortesía ESA).

Figura 6. Imagen Themis de las colinas de la gran depresión Juventae Chusma, donde se ha detectado yeso y otros sulfatos relacionados con la interacción agua-roca en Marte (foto: cortesía NASA/JPL/ASU).

determinados modelos geológicos y mineralógicos superficiales, como desde una perspectiva astrobiológica, la conexión volcanismo-agua, así como diferenciar claramente, desde el punto de vista de la exploración, si las interpretaciones y modelización se basan en los sistemas geológicos antiguos o actuales (figuras 4-6). Todos aquellos minerales relacionados con el agua en cualquier contexto, desde evaporíticos a hidrotermales son auténticos geomarcadores (Martínez-Frías et al., 2006, 2007). Son muchos los sistemas terrestres que están siendo explorados desde esta perspectiva, desde la Antártida a las áreas con actividad hidrotermal submarina de los fondos oceánicos, de los desiertos de Atacama a los ríos ácidos de la Faja Pirítica, o de las mineralizaciones del SE peninsular a los cráteres canadienses, entre otros.

En el caso del Centro de Astrobiología, los trabajos relacionados con análogos terrestres tienen como proyecto emblemático, sin duda, el área de Río Tinto (Fernández-Remolar et al., 2005). En nuestro laboratorio y en el marco de la Unidad Asociada CSIC-Universidad de Valladolid, los trabajos cubren, en colaboración estrecha con muchos otros colegas e instituciones, varios aspectos temáticos y zonas geodinámicas:

- ▶ La caracterización de aspectos mineralógicos y paragenéticos del sistema ácido superficial y subsuperficial de Río Tinto, en colaboración con especialistas en robótica, microbiología, química prebiótica y ecología microbiana (proyecto MARTE).

- ▶ El estudio comparado de sistemas hidrotermales de mineralización (en algunos casos biomineralización) subaéreos y submarinos en distintas áreas: Jaroso (jarosita), Sorbas (yeso), Golfo de Cádiz (chimeneas metanógenas), Taganana (jaspe-celadonita), Isla Decepción (emisiones submarinas-óxidos de Fe-Mn).
- ▶ Estudios de mineralogía, geoquímica y geología planetaria relacionados con la Tierra primitiva, en Pílbara (Australia) y zonas de volcanismo komaiítico.
- ▶ Simulaciones y análisis bajo condiciones marcianas de asociaciones minerales seleccionadas.

Consideraciones finales

Tal y como se indicó en la reciente Mesa Redonda del VII Congreso Geológico de España (Martínez Frías et al., 2008), la geología planetaria se encuentra en pleno desarrollo en los países avanzados y en nuestro país, poco a poco, va ocupando —aunque aún lentamente— mayores espacios, tanto en aspectos profesionales relacionados con la investigación como la docencia. No hay más que asomarse a las revistas científicas de alto impacto (*Nature*, *Science*) para comprobar cómo estudios de mineralogía o geodinámica marciana están siendo principales focos de interés. Los geólogos tenemos que ser capaces, sin complejos, de participar en las misiones espaciales como ya lo están haciendo especialistas de otras áreas. Sería absurdo que astrónomos, astrofísicos, químicos o ingenieros fueran los responsables del estudio de los minerales, rocas, geomorfología, geodinámica o geoquímica de Marte, o de la interpretación de los afloramientos que allí se encuentran, al igual que lo sería que nosotros pretendiéramos realizar su trabajo. Pero para ello es necesario, incluso, un cambio de mentalidad en muchas instancias académicas y científicas de nuestro país. Todavía hoy, en España, algunos de nuestros colegas ven estas investigaciones como inusuales, o incluso fuera de lugar, considerando como ciencia ficción la ciencia avanzada que se viene realizando con normalidad en otros países (Martínez Frías, 2006; Martínez Frías et al., 2008). Un ejemplo sintomático es el reciente congreso de la Sociedad Geológica de América (GSA) donde su división de Geología Planetaria, en su reunión anual del 5 al 9 de octubre en Houston, Texas, contó con 17 sesiones específicas sobre el tema, un programa de becas para estudiantes y el prestigioso galardón “G. K. Gilbert Award”, lo que nos da idea de la diferencia aún abismal que nos separa y lo que nos queda por avanzar en nuestro país en relación con esta disciplina. Es importante destacar que en el nuevo Plan Estratégico del CSIC la geología planetaria está incluida como sublínea específica de “Geología Planetaria y Atmósferas” dentro de la línea de “Habitabilidad” del Centro de Astrobiología. Asimismo, el ICOG viene apoyando de manera notable, durante los últimos diez años, iniciativas importantes relacionadas con la geología planetaria. Personalmente estoy convencido de que su futuro profesional es muy prometedor, pero, en muchos aspectos, su desarrollo y perspectivas de futuro en España dependen sobre todo de nosotros, los geólogos.

Agradecimientos

Gracias al Centro de Astrobiología (CAB) por su apoyo institucional y a todos sus miembros por su colaboración interdisciplinar en las investigaciones que estamos llevando a cabo. Gracias también al Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, por la presente iniciativa y su continua labor de apoyo a distintas actividades relacionadas con la geología planetaria. Más específicamente, deseo expresar mi agradecimiento a la doctora Olga Prieto, doctora Delphine Nna Mvondo, doctor Jens Ormö, doctor Guillermo Muñoz Caro, doctor Andrew Hill, Maite Fernández Sanpedro y María Paz Martín, así como a todos los miembros que pasaron por nuestro laboratorio en el pasado y que han participado en mayor o menor medida en el desarrollo de las investigaciones. Deseo asimismo dar las gracias a todos los colaboradores externos de nuestros trabajos, en particular a aquellos que han participado de manera más directa: profesor R. Lunar, profesor F. Rull, doctor Antonio Delgado y doctor José Antonio Rodríguez Losada. En el ámbito museístico mi agradecimiento especial a Jesús Madero y F. García Talavera por su extraordinaria labor al frente del Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha y del Museo de Ciencias Naturales de Tenerife respectivamente, y en el docente es obligada la mención del profesor Francisco Anguita (UCM), por su dedicación a la promoción y enseñanza de la geología planetaria en España.

Referencias bibliográficas

Arenillas, I.; Molina, E. y Schmitz, B. (1999). Planktic foraminiferal and $\delta^{13}\text{C}$ isotopic changes across the Paleocene/Eocene boundary at Possagno (Italy). *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 88: 352-364.

Arenillas, I.; Arz, J. A.; Molina, E. y Dupuis, C. (2000). An independent test of planktic foraminiferal turnover across the Cretaceous/Paleogene (K/P) boundary at El Kef, Tunisia: catastrophic mass extinction and possible survivorship. *Micropaleontology* 46(1): 31-49.

ASU (2006). <http://europa.la.asu.edu/>

Ayllón Quevedo, F. y Martínez-Frías, J. (2004). Procesos diagenéticos en la transición Cretácico-Terciario del sector occidental de la cuenca Vasco-Cantábrica. *Macla* 2: 59-60.

Bischoff, A. (2001a). Fantastic new chondrites, achondrites, and lunar meteorites as the result of recent meteorite search expeditions in hot and cold deserts. *Earth, Moon and Planets* 85-86: 87-97.

Bischoff, A. (2001b). Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts. *Planetary and Space Science* 49: 769-776.

Bradley, J. (2003). The astromineralogy of interplanetary dust particles. Henning, T. (ed.) *Astromineralogy*, Springer.

Cortés, A. L.; Díaz-Martínez, E.; Sanz-Rubio, E.; Martínez-Frías, J. y Fernández, C. (2002). Cosmic impact vs. terrestrial origin of the Azuara structure (Spain): A review. *Meteoritics & Planetary Science* 37: 875-890.

Díaz Martínez, E.; Sanz, E. y Martínez-Frías, J. (2002). Sedimentary record of impact events in Spain. *Geological Society of America Special Papers* 356: 551-563.

Fernández-Remolar, D. C.; Morris, R.; Gruener, J. E.; Amils, R y Knoll, A. H. (2005). The Río Tinto Basin, Spain: Mineralogy, sedimentary geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars, *Earth Planet. Sci. Lett.* 240: 149-167.

García Guinea, J.; Martín Escorza, C.; Fernández Hernán, M.; Sánchez Muñoz, L.; Correcher, V.; Sánchez Chillón, B. y Tormo, L. (2006). Meteoritos españoles del Museo Nacional de Ciencias Naturales. *Estudios Geológicos* 62(1): 11-30.

Grady, M. M. (2000). *Catalogue of meteorites: with special reference to those represented in the collection of the Natural History Museum, London.* Cambridge University Press. Cambridge. 5ª. ed.

Hernández-Fernández, S.; Rodríguez-Losada, J. A.; García Talavera, F.; Lunar-Hernández, R. y Martínez-Frías, J. (2008). La colección de meteoritos del Museo de Ciencias Naturales de Tenerife: Catalogación y resultados preliminares. *Geo-Temas* 10: 1495-1497.

Hill, A. C.; Grey, K.; Gostin, V. A. y Webster, L. J. (2004). New records of Late Neoproterozoic Acraman ejecta in the Officer Basin. *Australian Journal of Earth Sciences* 51: 47-51.

ISIS (2006). <http://isis.astrogeology.usgs.gov/>

Jenniskens, P.; Russell, R. W.; Yano, H.; Plane, J. M. C.; Murray, I. S.; Taylor, M. J.; Borovicka, J.; Kuenzi, K.; Smith, W. H.; Rairden, R. L.; Stenbaek-Nielsen, H. C.; Rietmeijer, F. J. M.; Betlem, H. y Martínez-Frías J. (2003). Investigation of the Ejection and Physical Properties of Large Comet Dust Grains and Their Interaction with Earth's Atmosphere During the 2002 Leonid Multi-Instrument Aircraft Campaign. *Bulletin of the American Astronomical Society*.

Llorca, J.; Trigo, J. M.; Ortiz, J. L.; Docobo, J. A.; García Guineez, J.; Castro Tirado, A.; Rubin, A. E.; Eugster, O.; Edwards, W.; Laubenstein, M. y Casanova, I. (2005). The Villalbeto de la

Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field, and petrography. *Meteoritics & Planetary Science* 40(6): 795-804.

Madiedo, J. M.; Trigo-Rodríguez, J. M.; Llorca, J.; Borovicka, J.; Zamorano, J.; Izquierdo, J. y Ocaña, F. www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/1815.pdf.

Martínez-Frías, J. (2002). <http://tierra.rediris.es/merge/congremeteor/>

Martínez-Frías, J. (2006). Interdisciplinarietà y Exploraci3n Planetaria. *Tribuna de la Ciencia*, julio: 3.

Martínez Frías, J. (2008). Meteohistoria. La investigaci3n de los meteoritos en España. *Historia de Iberia Vieja* 34: 90-95.

Martínez-Frías, J. y Chicarro, A. F. (2003). Vida y funci3n de los meteoritos. *El Cultural El Mundo*, 6 de febrero.

Martínez-Frías, J. y Madero, J. (2004). "The Iberia fireball event of 4 January 2004". *Interdisciplinary Science Reviews* 29(2): 1-6.

Martínez-Frías, J y Madero, J. (coord.) (2005). *Meteoritos y Geología Planetaria*. Ediciones Provinciales 23, Diputaci3n Provincial de Cuenca, 304 pp.

Martínez-Frías, J. y Orm3, J. (2005). Impactos meteor3ticos. *Revista Sociedad Española de F3sica*, abril-junio: 1-9.

Martínez-Frías, J. y Hochberg, D. (2007). Classifying science and technology: two problems with the UNESCO system *Inter. Sci. Rev.* 32(4): 315-319.

Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2008). Molina de Segura: the largest meteorite fall in Spain. *Astronomy & Geophysics* 49(4). 26-29.

Martínez-Frías, J.; Weigel, A.; Marti, K.; Boyd, T.; Wilson, G. H. y Jull, T. (1999). The Getafe rock: Fall, composition and cosmic ray records of an unusual ultrarefractory scoriaceous material. *Revista de Metalurgia* 35: 308-315.

Martínez-Frías, J.; Benito, R.; Wilson, G.; Delgado, A.; Boyd, T. y Marti, K. (2004). Analysis and chemical composition of larnite-rich ultrarefractory materials. *Journal of Materials Processing Technology* 147-2: 204-210.

Martínez-Frías, J.; Rull, F. y Lunar, R. (2004a). Mineralogía espacial: De la materia primigenia a la exploración de Marte. *Macla* 1: 11-18.

Martínez-Frías, J.; Benito, R.; Delgado, A. y Rodríguez-Losada, J. A. (2004b). Meteorites versus rocas terrestres: El pseudometeorito de Getafe, XXIV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, Cuenca. *Macla* 2: 55-56.

Martínez-Frías, J.; Amaral, G. y Vázquez, L. (2006). Astrobiological significance of mineral son Mars surface environments. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5: 219-231.

Martínez-Frías, J.; Lázaro, E. y Esteve-Núñez, A. (2007). Geomarkers versus biomarkers: Paleoenvironmental and astrobiological significance. *AMBIO: Journal of the Human Environment* 36(5): 425-427.

Martínez Frías, J.; García Talavera, F.; Rull, F.; López-Vera, F.; Capote, R.; Navarro Latorre, J. M.; Sánchez-Pinto, L.; López Rondón, J.; Rodríguez Losada, J. A.; Fernández Sampedro, M. T.; Martín Redondo, M. P. y Menor-Salvan, C. (2008). Impactos en Mauritania: nuevos datos mineralógicos, texturales y geoquímicos de las megabrechas de Richat y del cráter meteorítico de Aouelloul. *Geo-Temas* 10: 1487-1490.

Martínez Frías, J.; Lunar, R., Rodríguez-Losada, J. A.; Eff-Darwich, A. y Madero Jarabe, J. (2008). La Geología en la exploración planetaria. *Geo-Temas* 10: 1621-1624.

Martínez-Frías, J.; Rodríguez Losada, J. A.; Lunar, R., Rull, F.; Madero, J.; García Talavera, F.; Pérez Verde, A. y Hernández-Fernández, S. Meteorites as "geological heritage" in the new Spanish legislation: current state, scientific and etnical praxis, and international implications regarding geodiversity in the Earth and Solar System". *International Conference on Bolides and Meteorite Falls, Praga, 10-15 mayo de 2009.*

McSween, J. Y. Jr. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press, 310 pp.

Molina E.; Gonzalvo C. y Keller G. (1993). The Eocene-Oligocene planktic foraminiferal transition: extinction, impact and hiatuses. *Geological Magazine* 130(4): 483-499.

Muñoz-Espadas, M^o J. (2003). Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y LL5. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Muñoz-Espadas, M. J.; Martínez-Frías, J.; Lunar, R.; Sánchez, B. y Sánchez, J. (2002). The meteorite collection of the National Museum of Natural Sciences, Madrid, Spain: An update of the catalog. *Meteoritics & Planetary Science* 37, supl.: 89-95.

Muñoz-Espadas, M. J.; Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2003). Main geochemical signatures related to meteoritic impacts in terrestrial rocks: A review. Koeberl, C. y Martínez-Ruiz, F. *Impact Markers in the stratigraphic record*. Springer Nueva York, 65-91.

Ormö, J.; Dohm, J. M.; Ferris, J. C.; Lepinette, A. y Fairén, A. G. (2004). Marine-target craters on Mars? An assessment study *Meteoritics and Planetary Science*, vol. 39 (2), 333-346.

Ormö, J.; Martínez-Frías, J.; Díaz, E.; Lepinette, A.; Lindstrom, M. (2004). Experiments with explosives and ordnance disposal devices for the simulation of specific processes during shallow marine impacts. *Lunar and Planetary Science Conference XXXV* (www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1276.pdf).

Ormö, J.; Lepinette, A. y Martínez-Frías, J. (2005). A combination of impact experiments and numerical modelling in the analysis of special features at wet impacts and crater fields. *68th Annual Meteoritical Society Meeting (2005)* (www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc2005/pdf/5160.pdf).

Ormö, J.; Lindström, M.; Lepinette, A.; Martínez-Frías, J. y Díaz, E. (2006). Cratering and modification of wet-target craters: Projectile impact experiments and field observations of the Lockne marine-target crater (Sweden). *Meteoritics & Planetary Science* 41-10: 1605-1613.

Rull, F.; Martínez-Frías, J. y Rodríguez-Losada, J. A. (2006). Micro-Raman spectroscopy of El Gasco pumice (Western Spain). *Journal of Raman Spectroscopy* 38: 239-244.

Schmitz, B.; Asaro, F.; Molina, E.; Monechi, S. von; Salis, K. y Speijer R. P. (1997). High-resolution iridium, ^{13}C , ^{18}O , foraminifera and nannofossil profiles across the latest Paleocene benthic extinction event at Zumaya, Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 133 (1-2): 49-68.

SEM (2004). www.jccm.es/museociencias/modulos/sem/libroprogramaSEM.pdf

Spray, J. y Heins, J. (2006). www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/

USGS (2008). <http://astrogeology.usgs.gov/>

Weisberg, M. K.; Prinz, M.; Clayton, R. N.; Mayeda, T. K.; Grady, M. M.; Franchi, I.; Pillinger, C. T. y Kallemeyn, G. W. (1996). The K (Kakangari) chondrite grouplet. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 4253-4263.

El geólogo en los riesgos naturales

Miguel Ángel Rodríguez Pascua

Investigador Titular de OPI

Dpto. de Investigación y Prospectiva Geocientífica

Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

La Tierra, aunque sea uno de los cuatro elementos vulgares, no la debemos considerar como la mira el vulgo; quiero decir, que no es sólo un cuerpo basto homogéneo, o uniforme, que no sirve para otra cosa, que para que la habitemos los hombres, para sustentar edificios, para criar pastos, semillas, y árboles, y para muralla de los mares, que la rodean. Si queremos, como es razón, no contentarnos con lo que reflejan los ojos en la superficie de las cosas, ahondaremos un poco, y hallaremos lo que es la Tierra.

Dr. D. Antonio Jacobo del Barco

Satisfaciendo algunas preguntas curiosas sobre el terremoto
de primero de Noviembre de 1755 (1756)

Introducción

La Tierra es un planeta en el que el flujo energético, interior y exterior, hace que la superficie donde se desarrolla la vida sea una zona muy dinámica. Éstos son los procesos geodinámicos internos y externos, así como la dinámica atmosférica que da lugar a los fenómenos meteorológicos. La tectónica de placas es la responsable de la aparición de fenómenos naturales catastróficos como los volcanes o los terremotos, pero, ¿podríamos vivir sin volcanes y terremotos? La respuesta es negativa, puesto que el balance de gases producido por esta actividad mantiene la atmósfera, sin la cual no sería posible la vida en el planeta. Cuando cese esta actividad la Tierra sufrirá un proceso similar al que tuvo lugar en Marte cuando terminó su tectónica, perderá su

atmósfera y el agua líquida en superficie, reduciéndose considerablemente las posibilidades de vida. Por tanto, tendremos que ver estos fenómenos como necesarios para la vida y nunca al contrario. El problema aparece cuando la actividad del hombre interactúa con estos procesos catastróficos y surge el concepto de riesgo.

En la actualidad, la geología tiene la capacidad de prever dónde se podrán producir eventos catastróficos y la intensidad de los mismos, por lo que sería posible mitigar los efectos de las catástrofes, o incluso hacerlos desaparecer si no se realizasen actividades humanas en estas zonas. Otra cuestión muy diferente es la predicción, en la que entraría en juego la posibilidad de fijar en el tiempo un evento futuro, lo que no es posible en la actualidad, al igual que en otras áreas científicas como es la medicina. A muy corto plazo, días u horas, es posible hacer ciertas predicciones en algunos eventos catastróficos como inundaciones (que no sean repentinas: flash floods) y erupciones volcánicas. Pero la principal aportación de la geología está en prever localización e intensidad de catástrofes que, de este modo, si se actúa convenientemente al conocer estos datos, éstas tendrían efectos mucho menores. Se trata, pues, de aprender a convivir con las catástrofes naturales para mitigar sus efectos, como ocurre en las sociedades desarrolladas.

El concepto de riesgo está ligado a las pérdidas potenciales, económicas y/o en vidas humanas, provocadas por un evento catastrófico natural. Para calcular el riesgo (R) es pues necesario conocer los factores de riesgo como la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. La peligrosidad (P) es la probabilidad de que tenga lugar un evento catastrófico de un grado de intensidad determinado en un área asignada. La exposición (E) es el conjunto de bienes que pueden ser dañados por la acción de un peligro y que han de ser preservados de éste (pueden ser bienes de naturaleza humana, económica, estructural o ecológica). La vulnerabilidad (V) está referida a los daños o pérdidas potenciales provocadas por un evento de intensidad determinada en un elemento o conjunto de elementos. De este modo tenemos que:

$$R = P \cdot E \cdot V$$

Dependiendo de los diferentes sistemas de cálculo de riesgo existentes en la actualidad necesitaremos unos parámetros u otros, pero ése no es el objeto de este libro, por lo que daremos una idea del trabajo a desarrollar por la profesión de geólogo en riesgos naturales.

Para qué sirve la geología en los riesgos naturales

El riesgo es el producto de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, por lo que si hacemos que la vulnerabilidad sea cero el riesgo también lo será. Esto sólo será posible si la geología aporta datos sobre la localización de catástrofes futuras y la peligrosidad

asociada, para que se puedan reducir la vulnerabilidad y exposición. Ésta es una clara cuestión de ordenación del territorio, en el que las actuaciones humanas en la superficie terrestre se tienen que adecuar a la dinámica concreta de cada lugar.

El registro de catástrofes naturales es la base sobre la que se sustenta el concepto de peligrosidad, puesto que es necesario calcular el periodo de recurrencia de un determinado evento con una cierta intensidad en una área dada. El registro histórico e instrumental no siempre es suficiente para el cálculo de la peligrosidad, que en muchos casos infravaloraremos, al “desconocer” eventos acaecidos en el pasado y que no fueron registrados por el hombre. ¿Por qué conformarnos con intervalos temporales históricos si la geología del Cuaternario nos aporta datos de hace cientos o miles de años? Por tanto, el geólogo aporta tanto el dato de la intensidad del evento en cuestión como la edad del mismo, para poder calcular los periodos de retorno y recurrencia.

Este registro geológico se encuentra principalmente en sedimentos recientes y en evidencias geomorfológicas. Los principales procesos geodinámicos y meteorológicos con capacidad de generar eventos catastróficos y registro geológico de los mismos son, entre otros:

Procesos geodinámicos externos

- ▶ Colapsos.
- ▶ Subsistencia.
- ▶ Erosión.
- ▶ Deslizamientos.
- ▶ Inundaciones y avenidas.
- ▶ Procesos de arroyada.
- ▶ Expansividad y colapsabilidad de suelos.

Procesos geodinámicos internos

- ▶ Terremotos y maremotos (tsunamis).
- ▶ Vulcanismo.
- ▶ Diapirismo.

Procesos meteorológicos

- ▶ Lluvias torrenciales.
- ▶ Huracanes.
- ▶ Tornados.
- ▶ Aludes.

El intervalo temporal que se suele tener en cuenta en riesgos naturales abarca todo el Holoceno, pudiendo extenderse a parte del Pleistoceno, como ocurre con instalaciones nucleares (500 kA). Es, por tanto, la geología del Cuaternario la responsable del aporte de datos para la peligrosidad y posterior cálculo del riesgo. La geología va a ser capaz de aportar nuevos datos al registro en intervalos temporales muy amplios, integrarlos y obtener mapas de peligrosidad que serán utilizados para calcular el riesgo. El hecho de localizar espacialmente zonas susceptibles de ocurrencia de eventos catastróficos tiene aplicación en ordenación del territorio y en la reducción de la vulnerabilidad de estructuras preexistentes. Por tanto, la geología aportará cuantificación de eventos y sus intensidades, periodos de retorno en intervalos temporales amplios (Pleistoceno-Holoceno), cálculo de peligrosidad y cartografía de la misma y ordenación del territorio.

El trabajo que realiza

La labor que realizará el geólogo en riesgos estará condicionada con el tipo de riesgo a tratar, pero independientemente de éste el trabajo constará de una parte técnica y práctica, otra teórica y otra de investigación. Todo este trabajo está siempre integrado dentro de equipos multidisciplinarios, independientemente del tipo de riesgo. A continuación, comentaremos los tipos de riesgo con mayor incidencia en España, entre los que se encuentran el sísmico, volcánico, deslizamientos y el de mayor ocurrencia: las inundaciones.

Riesgo sísmico

Teniendo en cuenta esto podemos utilizar como ejemplo uno de los riesgos más impactantes en la sociedad, el riesgo sísmico. En cualquier estudio de riesgos es necesario recopilar toda la información existente al respecto en la zona a estudiar, tanto registros sísmicos históricos e instrumentales como trabajos geológicos previos (cartografías geológicas, estudios geofísicos, geocronologías, etc.), siempre que éstos existan. Uno de los puntos clave será la cartografía de fallas con evidencias de actividad neotectónica reciente, bien sea por criterios geomorfológicos, estratigráficos o estructurales. Bien, ya tenemos un conjunto de fallas "candidatas" a ser sismogénicas, pero necesitamos conocer cuál es la orientación de éstas con respecto al campo de esfuerzos reciente y actual, ya que éste es el responsable del movimiento de las fallas activas. El campo de esfuerzos reciente se calculará a partir de análisis poblacional de fallas en materiales cuaternarios y el actual a partir del estudio de inversión de esfuerzos mediante mecanismos focales de terremotos (entre otras técnicas). Enfrentando esta información a la cartografía de fallas potencialmente activas podremos ir acotando más aun la solución, ya que sólo se moverán las fallas que estén orientadas preferentemente a este campo de esfuerzos. La geomorfología será, en este caso, una gran aliada para observar qué fallas

potencialmente activas presentan evidencias de actividad sísmica reciente. Esta parte del estudio, en combinación con el levantamiento microtopográfico de alta resolución, nos mostrará los escarpes de falla más recientes y que aún no hayan sido degradados del todo por la erosión. De este modo, hemos restringido las fallas con mayor número de evidencias neotectónicas, a lo cual podemos sumar la actividad sísmica instrumental, siempre que ésta sea representativa y la densidad de la red sísmica permita localizaciones epicentrales e hipocentrales fiables. Es clave tener un control tridimensional de las fallas e hipocentros, ya que si los planos de falla tienden a ser horizontales veremos sobre el mapa “nubes” de epicentros que en superficie no se ajustan a ninguna traza de falla, pero que si observamos en un corte correctamente orientado podremos asignar a un único plano. En el caso de fallas de buzamientos altos, como son los desgarres, los epicentros aparecerán perfectamente alineados según la traza de la falla. Esto lo podremos comprobar de forma práctica si dibujamos sobre una hoja de papel unos puntos de forma aleatoria, asumiendo que el papel es un plano de falla y los puntos hipocentros de terremotos, si ponemos el plano vertical todos los hipocentros se proyectarán en la horizontal sobre la traza de plano de falla y si disminuimos la inclinación de la hoja veremos en planta una nube de puntos sin que se observen alineaciones.

Pero, ¿cómo podemos saber si la falla se ha movido sísmicamente?, para este paso de la investigación surge la paleosismología, encargada del estudio de los terremotos antes de las primeras crónicas históricas. Generalmente, debido a la juventud de los escarpes de origen sísmico acaecidos durante el Holoceno, no existen afloramientos donde se puedan observar con claridad las fallas, por lo que tendremos que recurrir a técnicas de trinchera artificial que seccionen el plano de falla a estudiar (figura 1). La elección de la

Figura 1. Trincheras realizadas en sedimentos lacustres holocenos del lago de Pátzcuaro, para localizar fallas activas y calcular la magnitud y edad de los terremotos acaecidos antes de las primeras crónicas históricas (isla lacustre de Jarácuaro, Michoacán, México).





Figura 2. Toma de datos de sísmica de reflexión y sondeos en sedimentos lacustres holocenos del lago de Lucerna (Suiza), para la localización y datación de eventos sísmicos e inundaciones.

posición de la trinchera es uno de los puntos más delicados e importantes de la investigación. Para este objetivo nos podremos ayudar de la microtopografía y de la geofísica, como perfiles gravimétricos o de georadar, para confirmar en la medida de lo posible que el lugar seleccionado para realizar la trinchera es el adecuado. Una vez realizada la trinchera y cortada la falla, pasaremos a estudiar los diferentes saltos de falla que se hayan producido, mediante el estudio estratigráfico de las cuñas detríticas asociadas a cada salto de falla. Si podemos ver la estría de la falla y calcular el salto real para cada evento y conocemos la longitud de la ruptura, se podrán calcular las energías necesarias para mover la falla en cada terremoto. El siguiente paso es realizar la geocronología de cada uno de los terremotos, utilizando la técnica más adecuada en relación a los materiales que estemos cortando. Otra forma de identificar terremotos es la localización de sismitas (estructuras de deformación de origen sísmico en sedimentos recientes), siendo los lagos uno de los medios sedimentarios mejores para su registro (figura 2).

Ya tenemos las fallas activas, los eventos que se han generado en el Holoceno, las energías liberadas y ahora sólo faltaría calcular los periodos de retorno, necesarios para el cálculo de la peligrosidad. Estas técnicas pueden ampliar el catálogo sísmico miles de años y cobran especial interés en zonas en las que no hay registro sísmico histórico y/o instrumental. En 1954, Gutenberg y Richter ya advierten que en la mayoría de los países los registros sísmicos usuales abarcan solamente unos pocos siglos y que muchas zonas con fallas activas no han registrado terremotos importantes. Éste es el claro aporte de la geología —y en este caso de la paleosismología—, aportar datos en abanicos temporales amplios y la determinación de las principales fuentes sismogénicas, esenciales para la elaboración de mapas de riesgo sísmico.

Riesgo volcánico

Otro riesgo geológico con una fuerte repercusión social es el volcánico, a pesar de que no genere un gran número de víctimas con respecto a otros riesgos naturales. Tiene un fuerte tratamiento por parte de los medios de comunicación, al ser una de las representaciones más espectaculares de la energía interna de la Tierra. En España, este riesgo quedaría restringido a las islas Canarias, consideradas como una zona volcánicamente activa con 17 volcanes activos, de los que se pueden destacar el Teide, Teneguía y Timanfaya. Se denominan volcanes activos a aquellos que han tenido erupciones históricas. La volcanología ha experimentado un fuerte impulso en las últimas dos décadas, avanzando a la par los estudios de riesgo volcánico. Para abordar estudios de riesgo volcánico es necesario tener clara la historia eruptiva del volcán en cuestión, datos que provienen del estudio geológico de las diferentes erupciones (figura 3). Por otra parte, es necesario independizar los diferentes tipos de riesgos que genera una erupción volcánica y sus periodos de recurrencia, ya que no será lo mismo el riesgo asociado a coladas de lava que al de nubes ardientes. A diferencia de otros riesgos, como el sísmico, puntuales en el tiempo, el volcánico requiere la adaptación del mismo a procesos que pueden durar días o meses.



Figura 3. Volcán monogenético de la Taza 8 ka y registro geológico de su actividad (Arco Volcánico Transmexicano, Michoacán).

La volcanología va a comprender tres grandes áreas de conocimiento: geología, física y química. A la hora de elaborar mapas de riesgo, la geología aportará datos a la física para la elaboración de modelos físicos y matemáticos. El estudio de los diferentes productos volcánicos como las coladas de lavas y los materiales volcanosedimentarios, que encontramos en las inmediaciones de volcanes activos, aportarán información de la magnitud y explosividad del volcán. Para completar la historia eruptiva del mismo entrará en juego la geocronología, que nos permitirá calcular los periodos de retorno para una tipología eruptiva en cuestión. Los estudios petrológicos y geoquímicos arrojarán luz sobre la dinámica de la erupción y, en combinación con los anteriormente citados, de la extensión de la misma. Todos estos datos irán al sistema de vigilancia, el cual estará gestionado por un SIG, que mediante simulación numérica creará un mapa de peligrosidad. Los sistemas de vigilancia van a combinar datos meteorológicos, tremor sísmico (registrado mediante la instalación de una red de sismógrafos), deformaciones superficiales, emisiones de gases, etc., por lo que el trabajo multidisciplinar es básico en este tipo de contingencias.

Los factores de peligro a tener en cuenta son numerosos: proyección de bombas y escorias, caída de piroclastos, dispersión de cenizas, lavas y domos, coladas y oleadas piroclásticas (nubes ardientes), lahares, colapsos del edificio volcánico, deslizamientos, gases, onda de choque, terremotos y temblores volcánicos, deformaciones del terreno, variaciones en el sistema geotérmico de acuíferos, inyección de aerosoles en la atmósfera, etc. Pero no todos los peligros van a estar asociados directamente a la erupción, ya que algunos como los lahares (coladas de barro) se pueden dar sin que se llegue a producir la erupción y también tendrán que ser tenidos en cuenta. Afortunadamente, hay una actividad previa a la erupción que nos “avisa” si el sistema de vigilancia está correctamente diseñado y los datos son correctos. Además, la incidencia de la erupción está restringida a una área alrededor del foco emisor que puede ser delimitada, por lo que se conocen con antelación las poblaciones que pueden ser afectadas por la erupción. Estas “ventajas” se complican considerablemente cuando la zona está intensamente habitada, tendencia que en la actualidad es cada vez mayor, como es el caso del Vesubio en Italia. Por tanto, unas de las labores más importantes del trabajo del geólogo en riesgo volcánico serán desentrañar la historia eruptiva, calcular los periodos de recurrencia para la peligrosidad y aportar los datos que serán la base de los modelos físicos y matemáticos para la elaboración de modelos y mapas de riesgo.

Riesgo por deslizamiento y colapso

Son los procesos gravitacionales los principales responsables de deslizamientos y colapsos, pudiendo causar daños económicos y sociales importantes, al afectar tanto a poblaciones como a grandes infraestructuras. Un caso extremo de esta situación son

los deslizamientos que se pueden producir en embalses, que podrían generar problemas importantes por desbordamiento o la rotura directa de la cerrada de la presa.

Los deslizamientos son conocidos en sentido genérico como movimientos de ladera y están influenciados tanto por procesos geológicos, como climáticos, sin olvidar parámetros ambientales como la deforestación. Las laderas de los relieves que vemos en superficie tienden a un equilibrio en las condiciones actuales y es al variar alguna de estas condiciones cuando se pueden generar los deslizamientos, que pueden ser de muy diferente naturaleza: deslizamientos rotacionales y traslacionales, flujos, desprendimientos, vuelcos, avalanchas, desplazamientos laterales, etc., condicionando sus características en función del tipo de sustrato deslizado (rocas, suelos, derrubios, etc.). La labor del geólogo en este tipo de riesgos va a estar encaminada a evaluar la peligrosidad de ocurrencia en el caso de que se varíen algunas de las condiciones ambientales, como el movimiento de materiales por una gran obra, para lo cual utilizará la mecánica de rocas y la ingeniería geológica. Estas técnicas están íntimamente ligadas en el caso de los deslizamientos y aportarán predicción y soluciones a la interacción con la actividad humana que genera las situaciones de riesgo.

El trabajo de campo estará precedido de la revisión de la cartografía geológica existente y de fotointerpretación y teledetección. La geomorfología es otra herramienta básica en la identificación de deslizamientos o zonas susceptibles de serlo, por lo que el uso de mapas geomorfológicos va a suministrar una información básica en este tipo de riesgos. Esto focalizará la búsqueda de afloramientos susceptibles de producir riesgo. El reconocimiento sobre el terreno de zonas inestables servirá para la toma de datos in situ (como fracturación), aplicar técnicas de geofísica, ensayos de campo y toma de muestras y, si es necesario, se realizarán sondeos. Una parte importante del estudio son los ensayos geotécnicos de laboratorio que aportarán datos geomecánicos de los materiales estudiados y que servirán para el cálculo de estabilidad. Otra técnica empleada es la monitorización mediante instrumentación de laderas, con el uso de inclinómetros, extensiómetros, tiltímetros y piezómetros, que dan una información a tiempo real de la evolución del deslizamiento o potencial deslizamiento. Con todos estos datos se elaboran modelos y mecanismos de rotura, que se podrán utilizar para tomar medidas correctoras.

Los factores que más van a influir en este tipo de riesgos y que tiene que aportar el trabajo del geólogo, son los siguientes: litologías y grado de alteración, estructura, comportamiento geomecánico, propiedades físicas y resistentes de las rocas y parámetros hidrogeológicos. Nuevamente es necesario un trabajo multidisciplinar, ya que, por ejemplo, fuertes precipitaciones pueden generar importantes deslizamientos, por lo que la interacción con la meteorología es clara. Otro mecanismo disparador de deslizamientos son



Figura 4. Desprendimientos en el Tolmo de Minateda (Albacete, España), asociados al terremoto de Lisboa del 1 de noviembre de 1755. Investigaciones recientes apuntan la posibilidad de que el origen fue un terremoto del siglo IX-X. Nótese las tumbas antropomórficas (visigodas) cuya posición original era la zona alta del Tolmo. Calizas bioclásticas marinas del Mioceno medio.

los terremotos, teniendo en España buenos ejemplos asociados a terremotos históricos importantes (figura 4).

Riesgo de inundaciones

El riesgo geológico con mayor incidencia en nuestro país es el de inundaciones, generando pérdidas que se aproximan a los 750 millones de euros al año (desde el año 1987, y se estima que aumenten a los 857 millones anuales hasta el 2033). Como en todo cálculo de periodos de recurrencia y peligrosidad es necesario contar con una muestra estadísticamente representativa y, en el caso de las inundaciones en España, los datos no suelen superar los 20 años de registro histórico. Esto hace que los cálculos realizados estén infravalorados para las avenidas máxima y de diseño (para periodos de recurrencia de 500 años, que es el intervalo exigido por la legislación para la construcción de grandes presas). Nuevamente entra en juego la problemática de la extensión del

intervalo temporal con el que contamos para los cálculos de periodos de recurrencia y la intensidad máxima del evento en cuestión. Pero, una vez más, la geología vuelve a aportar soluciones, en este caso el estudio de las paleoinundaciones, que utilizarán los datos proporcionados por la estratigrafía en crecidas acaecidas en los últimos 10.000 años, extenderán las series de caudales, acercándolos o incluso igualándolos a los obtenidos de las estaciones de aforo.

El registro estratigráfico de paleoinundaciones se va a dar en zonas de baja energía en la zona inundada, como las zonas laterales de los valles, las desembocaduras de afluentes, en meandros abandonados o dentro de cavidades y cuevas desarrolladas en las paredes de cañones rocosos. La potencia de los depósitos generados puede oscilar desde unos pocos centímetros hasta más de un metro, compuestas por series granoderecientes, formadas por arenas, limos y arcillas. Al final de la columna estratigráfica podremos encontrar ripples de corriente o, en algunos casos, grietas de desecación. Las estructuras sedimentarias nos darán información de la velocidad y profundidad de la lámina de agua durante la inundación, marcando el nivel mínimo que alcanzó el agua en una inundación. Una vez localizados los distintos niveles de las paleocrecidas se pasa a la datación de los sedimentos, para lo que se utilizarán técnicas geocronológicas como, por ejemplo, el C^{14} , si existe materia orgánica que datar, o termoluminiscencia si se carece de ésta (entre otras) (figura 5).



Figura 5. Depósitos de inundación de baja energía (Slackwater sediments) en el río Ebro (tramo Benifallet-Miravet, Tarragona, España). En la ampliación se puede observar el detalle de los sedimentos depositados por una inundación y con una capa con abundante materia orgánica susceptible de ser datada con C^{14} .

Aún nos falta un dato fundamental en el cálculo de paleoinundaciones, la estimación de caudales. Ya disponemos de la altura mínima que alcanzó el agua durante la crecida, ahora necesitamos conocer la sección del cauce, para lo cual necesitaremos zonas del río que no hayan variado durante largos periodos de tiempo. Es decir, secciones formadas por rocas competentes que no hayan variado sustancialmente su morfología en miles de años. Ahora tenemos que multiplicar el área de la sección por la velocidad de flujo del agua. Para calcular la velocidad de flujo se utilizan métodos iterativos (prueba-error) en la resolución de una ecuación de energía en una dimensión, derivada de la fórmula de Bernoulli para flujo estacionario y gradualmente variado.

Con todos estos datos tendremos los caudales mínimos que tuvieron los sistemas fluviales estudiados durante las paleocrecidas, aportando nuevos datos al registro. Con la aplicación en la actualidad de estos métodos se está demostrando que muchas de las crecidas calculadas superan con mucho las estimadas con los datos de las estaciones de aforo.

Con toda esta información sobre peligrosidad, obtenida mediante diferentes técnicas de campo, gabinete e informáticas, e independientemente del tipo de riesgo, se obtendrán los mapas de riesgo al multiplicar estos valores por la vulnerabilidad y exposición. Todos estos mapas serán utilizados a diferentes niveles, desde ayuntamientos hasta nivel estatal, pasando por comunidades autónomas, pero con un único objetivo, reducir la incidencia de los riesgos geológicos que puedan afectar a la población. Por tanto, el trabajo del geólogo en riesgos es uno de los que mayor repercusión social puede tener.

Los conocimientos que aporta

La complejidad de los procesos geológicos hace que la experiencia y la alta cualificación del profesional dedicado a riesgos sea una de las claves para su trabajo. Los fenómenos que son relativamente sencillos desde un punto de vista teórico, cobran una gran complejidad cuando el geólogo se enfrenta al problema sobre el terreno. Esta cuestión hace que en algunos casos se obvien a priori procesos potencialmente peligrosos por profesionales ajenos a la geología o se tomen medidas "sobre el papel" sin realizar los estudios adecuados. En este caso, el trabajo del geólogo es clave a la hora de informar sobre riesgos potenciales y mitigar sus consecuencias, cobrando una dimensión social incuestionable. Los conocimientos que aporta van a tener fundamentalmente tres componentes: teórica, práctica e integradora de procesos; tanto en el registro de nuevos datos de catástrofes, como en el tratamiento de información a tiempo real.

El conocimiento del medio geológico será utilizado por el geólogo para planificar el estudio a realizar, diseñar las campañas de campo, toma de muestras, tratamiento de datos, etc. Como consecuencia de esto podrá elaborar presupuestos para evaluar los

costes económicos totales de la investigación a realizar. El trabajo de campo se basa fundamentalmente en la experiencia adquirida por el profesional de la geología a lo largo de los años. Ésta es una de las fases más importantes de todo el proceso de cálculo de riesgos, puesto que la calidad de los modelos y cartografías finales van a depender de la exactitud y rigurosidad en la toma de datos en campo. Esto irá combinado con estudios de teledetección y cartografía digital que apoyará la campaña de campo y reconducirá el diseño de la toma de datos. El tratamiento de los datos en gabinete es otro de los puntos clave, partiendo de buenos datos de campo, los análisis serán más sencillos y las soluciones arrojarán luz sobre los procesos estudiados. Con todo esto, el geólogo pasará a la elaboración de modelos que servirán para el cálculo de la peligrosidad y posterior riesgo.

Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las claves para el conocimiento en profundidad de las catástrofes naturales es aumentar el registro de datos en intervalos temporales mucho mayores que los existentes en la actualidad. Es decir, que la clave del futuro está en el pasado geológico. Por ejemplo, un volcanólogo aportará datos de los diferentes tipos de erupciones que ha podido tener un determinado volcán a lo largo de su historia geológica, lo que redundará en que las medidas de seguridad estarán condicionadas por estos datos. Ese mismo volcanólogo, integrado en un equipo multidisciplinar de geofísicos y geoquímicos, será capaz de interpretar a tiempo real la información que pueda llegar de la monitorización de un volcán activo y realizar una predicción a corto plazo de la erupción.

Por tanto, la labor del geólogo en riesgos debe integrarse en un equipo multidisciplinar de expertos, que en su conjunto serán los encargados de realizar la evaluación del riesgo en cuestión. Y aportará conocimientos sobre el medio geológico, dinámica de procesos, integración y tratamiento de datos e interpretación genética de procesos, entre otros.

Herramientas que utiliza

Las herramientas que maneja un geólogo en riesgos no son muy diferentes de las que se utilizan en otras áreas de conocimiento de la geología, puesto que, dependiendo del problema al que se enfrente, éstas podrán ir desde técnicas estratigráficas hasta Sistemas de Información Geográficos (SIG), pasando por la geocronología. Lo que va a variar fundamentalmente es la forma de utilizarlas y la interrelación entre ellas.

Como ya se ha citado con anterioridad, una de las claves del estudio de riesgos naturales es el trabajo de campo, para el cual siempre son imprescindibles las clásicas herramientas de: brújula, martillo, lupa, mapas topográficos y geológicos, estereoscopio de

campo, fotografía aérea, etc. En la actualidad el geólogo ya incorpora útiles herramientas de última generación como receptores portátiles de GPS, que pueden estar conectados a PC de bolsillo, para cartografía digital sobre el terreno o directamente sobre tablet-PC. Esta última herramienta va a permitir utilizar de forma directa un ordenador en el campo, pasando datos a tiempo real con la posibilidad de emitirlos vía satélite a una central de datos gestionada por un SIG, lo cual puede ser de vital importancia en el estudio de riesgos como el volcánico.

La estratigrafía es una de las áreas de conocimiento que más datos puede aportar a riesgos, puesto que abre el abanico temporal a miles o millones de años, siendo parte fundamental en lo que se ha venido a conocer como la geología del Cuaternario. En este caso se ocupa del registro geológico (sedimentos) de eventos catastróficos, teniendo la difícil tarea de discriminar otros posibles orígenes que no sea del riesgo en cuestión y de la geocronología de los mismos. La estratigrafía se va a centrar especialmente en sedimentos continentales, que generalmente están mejor expuestos que los marinos, aunque estos últimos se están mostrando como una importante fuente de datos cuaternarios en la actualidad. Esto es posible gracias al avance en las técnicas de la toma de datos desde buques oceanográficos. Son pues los datos procedentes de ambientes sedimentarios fluviales y lacustres los que mayor información van a aportar en riesgos, como es el caso del papel de los depósitos de inundación de baja energía (slackwater sediments) en inundaciones o las sismitas (estructuras de deformación de origen sísmico en sedimentos recientes) en el caso de la paleosismología.

La geomorfología es una de las herramientas básicas en cartografía de procesos activos. Los cambios de la morfología de la superficie del terreno en tiempos recientes van a estar siempre asociados a procesos activos, por lo que es clave a la hora de identificar zonas afectadas por estos fenómenos. Por tanto, nos va a servir como un identificador previo de fenómenos catastróficos, como podrían ser abanicos aluviales o conos de deyección, facetas triangulares en fallas activas, lóbulos de derrame en inundaciones, deslizamientos, etc.

El software que se puede utilizar en el tratamiento de datos en bruto puede ser específico de cada área de riesgos, pero todos los datos siempre estarán gestionados y centralizados en un SIG. La cartografía geológica, entendida como una herramienta para riesgos, se ha de utilizar en formato digital, para poder integrarse como una de las bases del análisis de riesgos, al igual que cartografías temáticas específicas, como la geología estructural. Una vez obtenidos los resultados del tratamiento de datos, el SIG nos va a permitir realizar una cartografía de riesgos y actualizaciones de forma rápida, que es uno de los objetivos principales. La gestión del territorio que se puede deducir de estos mapas de riesgo también se gestiona mediante SIG. Pero lo más importante, los mapas

de riesgos son “mapas vivos”, hay que actualizar la información de forma constante y a tiempo real. Un buen ejemplo de esto es la página de riesgo sísmico que tiene el USGS (United States Geological Service), en la que el usuario puede elegir las coordenadas de la zona en la que quiere obtener el mapa de peligrosidad y riesgo y ésta lo calcula a tiempo real, con las últimas actualizaciones de fallas activas y sismicidad. Es decir, que muy probablemente, si elegimos una zona en California a los pocos meses podamos obtener un mapa “distinto” (actualizado) para la misma área.

Una de las herramientas más utilizadas en riesgos es la teledetección, entendida como la técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en satélites, bien sea por la reflexión de la energía solar o por un haz energético artificial, o bien por emisión propia. Es interesante que el propio SIG incluya un módulo de teledetección que permita integrar esta información rápidamente, como podría ser en el caso del vulcanismo o el de las deformaciones corticales superficiales previas a un terremoto en una falla activa. También aportaría una información de gran valor para establecer medidas de actuación en el caso de inundaciones.

Las técnicas geofísicas son una importante fuente de datos en riesgos, especialmente en cuestiones de recopilación de datos sísmicos, prospección del subsuelo, como puede ser en la búsqueda de fallas activas y monitorización de volcanes activos. La sísmica de reflexión es utilizada tanto en la superficie emergida como en prospecciones marinas, dando excelentes resultados en la búsqueda de estructuras activas en profundidad. El georadar es muy útil en superficies emergidas, pero en este caso con menor grado de penetración en el subsuelo. La sismología es pieza clave en geología de terremotos y en volcanología. En la primera nos permite conocer el carácter (normal, inverso, en dirección) de la falla que ha generado el seísmo, además de su localización hipocentral. En el caso de la volcanología, el estudio del tremor volcánico es una herramienta esencial para evaluar la posibilidad de erupción. Al igual que la gravimetría y la magnetimetría, utilizadas tanto para la localización de fallas, como para la determinación de erupciones volcánicas. En líneas generales no se suele aplicar una única técnica, sino que se utiliza una combinación de éstas para contrastar las soluciones obtenidas.

En la actualidad, la geodesia aplicada a procesos activos se basa en buena parte en la aplicación de técnicas avanzadas de GPS, que permiten una resolución milimétrica. De hecho, en la actualidad se utilizan para medir velocidades relativas de placas tectónicas o para medir deformaciones durante procesos eruptivos o deformaciones precursoras de eventos sísmicos. Para este tipo de medidas se precisa de una estación fija que reduzca el error de las estaciones móviles empleadas para realizar medidas de forma sistemática en un mallado diseñado con anterioridad. La microfotografía clásica o la generada mediante sistemas LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection

and Ranging), son herramientas muy utilizadas en riesgos como el volcánico, inundaciones, deslizamientos o terremotos. En esta misma línea también se utilizan las imágenes InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) para interferometría de radar, como en los terremotos. Todas estas técnicas, aplicadas de forma continuada, nos van a dar movimientos y velocidades de deformación, que podremos aplicar en la monitorización de diferentes tipos de riesgos.

La ingeniería geológica va a aportar soluciones a problemas constructivos asociados a riesgos desde una perspectiva geológica, como es el caso de deslizamientos relacionados con grandes obras, como autopistas, presas, túneles, cimentaciones, etc. Por tanto, su función irá encaminada a que los factores geológicos desencadenantes de riesgos sean tenidos en cuenta e interpretados adecuadamente y a evitar o minimizar los efectos de los riesgos geológicos. Un ejemplo claro es la determinación de los parámetros mecánicos de materiales recientes en los estudios de microzonación sísmica.

La geocronología puede considerarse como una de las piezas clave en las herramientas utilizadas en riesgos, puesto que de ella depende el correcto cálculo de periodos de recurrencia, a partir de los cuales calcularemos la peligrosidad. Por tanto, necesitaremos dataciones absolutas para este fin. En algunos casos se pueden obtener dataciones mediante crónicas históricas, pero el periodo que abarca ya sabemos que no es fiable en España más allá del año 1500. Otras dataciones absolutas son la dendrocronología, que estudia los anillos de crecimiento en árboles, o el carácter anual de la sedimentación varvada en lagos (cada par de láminas indica un año de sedimentación). Otra técnica es la liquenometría, basada en la velocidad de crecimiento y colonización de diferentes especies de líquenes en una superficie expuesta. Pero no siempre es posible llevar a cabo estas dataciones, por lo que lo más común es tener que recurrir a dataciones absolutas, como son las radiométricas; algunas de las más utilizadas son:

- ▶ Radiocarbono (C^{14}).
- ▶ Series de uranio (U).
- ▶ Potasio-Argón (K-Ar).
- ▶ Argón-Argón (Ar-Ar).
- ▶ Huellas de fisión en apatitos (fission-track).
- ▶ Cosmogénicos.

Cada uno de estos métodos se aplicará en función del tipo de materiales de los que dispongamos para datar y de la edad de los mismos. Por ejemplo, aunque dispongamos de restos vegetales abundantes en un afloramiento a datar, si podemos saber mediante dataciones relativas que tiene una edad superior a los 75 ka no podremos utilizar el C^{14} , puesto que éste es el umbral máximo para el uso del radiocarbono de forma fiable. Si la

cantidad de muestra es escasa no podremos pasar de los 30 ka. Éstas están basadas en el tiempo de semidesintegración del C^{14} , pero si queremos medidas de C^{14} calibradas mediante dendrocronología el patrón sólo abarcaría hasta los 4.500 años. La geocronología con C^{14} se puede realizar mediante contadores de gas o mediante un espectrómetro de acelerador de masas (AMS). Este último es capaz de datar muestras orgánicas de muy pequeño tamaño, por lo que es una buena alternativa en algunos casos. Si necesitamos datar cenizas volcánicas usaremos el K-Ar, en los feldespatos que podamos separar de la muestra. Estas técnicas son caras y dependiendo de la situación no todas se pueden llevar a cabo, por lo que habrá que recurrir a la combinación de distintos métodos para llegar a una solución contrastada, que nos dé una solución con el mínimo error posible.

Otras técnicas absolutas no radiométricas son la termoluminiscencia (TL) y los cosmogénicos. La TL es ampliamente utilizada para sedimentos fluviales y se basa en la propiedad que tienen algunos minerales (como el cuarzo, feldespatos o calcita) a emitir luz después de ser calentados y haber sido expuestos a radiación natural. Un grano de cuarzo que sea enterrado en un sedimento, deja de ser expuesto a una fuente de radiación primaria (el Sol) y empieza a recibir radiación natural del medio y la acumulará de manera proporcional al tiempo de enterramiento. Por este motivo, al calentarlo emitirá una cantidad de luz equivalente al tiempo que lleva enterrado y nos dará la edad del sedimento. Esta técnica es muy utilizada en cerámicas, puesto que al cocerse la pieza, su "reloj" se pone a cero y al enterrarse es cuando comienza a recibir la radiación, en este caso no nos daría la edad de cuando se hizo la pieza, sino de cuando fue enterrada. Otras dos variantes de esta técnica son la termoluminiscencia estimulada ópticamente (OSL) o por infrarrojos (IRSL). Estas dataciones son una buena alternativa en el caso de que haya escasez de materia orgánica, como suele ocurrir en zonas áridas y semiáridas.

Por tanto, la geocronología será una de las áreas más importantes a desarrollar en el trabajo del geólogo en riesgos, ya que condicionan el dato más importante, el periodo de recurrencia y, de forma indirecta, la peligrosidad. Será, pues, necesario combinar correctamente las diferentes técnicas aplicadas junto con la meticulosidad en la toma de muestras.

Con qué profesionales se relaciona

La principal característica que representa el trabajo del geólogo en riesgos geológicos es la multidisciplinaridad, tanto dentro de las diferentes áreas de conocimiento pertenecientes a la geología como áreas afines. Si tenemos en cuenta lo citado en apartados anteriores, el geólogo va a interactuar con un amplio espectro de profesionales de las ciencias de la Tierra, ingeniería y geodesia. De este modo, el geólogo tendrá que trabajar con geofísicos en cuestiones de riesgos volcánicos, sísmicos y deslizamientos. Con meteorólogos en inundaciones, ya que éstos aportarán datos valiosísimos relacionados

con precipitaciones, tanto a nivel de registro como desde una perspectiva predictiva. Para ampliar el catálogo de datos al máximo también colaborará con historiadores y arqueólogos. En la mitigación de riesgos trabajará junto con ingenieros y arquitectos en el diseño de estructuras que sean resistentes a los riesgos en cuestión o para ubicarlas en lugares alejados de la zona de influencia de dichos riesgos. Los topógrafos aportarán mapas de detalle de las zonas a estudiar. Quizás la relación más alejada del mundo técnico y científico es la que existe con la clase política, esta estará enfocada tanto a la toma de decisiones como a la legislación relacionada con la mitigación de riesgos.

¿Quiénes son sus principales clientes?

El diferente alcance de los riesgos geológicos va a condicionar el tipo de clientes que pueden hacer uso de este tipo de estudios, que podrían ir desde un particular hasta un Estado o confederaciones internacionales de países que se viesen afectados por un mismo riesgo. El avance en la legislación ambiental, cada vez más restrictiva en relación a riesgos naturales, hace que se haya abierto considerablemente el abanico de clientes con los que cuenta el geólogo de riesgos. Así, la pequeña y mediana empresa, dedicada a estudios geológicos y geotécnicos demanda este tipo de estudios que irán encaminados a riesgos que puedan afectar a obras públicas o planificación urbanística. Del mismo modo, las grandes multinacionales del sector requieren asesoramiento en riesgos e incluso generan sus propios departamentos de I+D+i en los que se tratan los riesgos naturales. Las aseguradoras basan sus cuotas en los trabajos realizados por los geólogos en temas como riesgo sísmico, volcánico o deslizamientos, por ejemplo. A nivel administrativo, el trabajo en riesgos es demandado desde ayuntamientos, diputaciones provinciales, comunidades autónomas y el Estado, teniendo en este caso una importante dimensión social y de avance en el conocimiento de riesgos, característica de sociedades avanzadas.

Referencias bibliográficas

Astiz, M. y García, A. (2000). Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Excmo. Cabildo de Lanzarote, Lanzarote.

Ayala-Carcedo, F. J. y Ferrer, M. (1988). Catálogo Nacional de Riesgos Geológicos. IGME, Madrid.

Ayala-Carcedo, F. J. y Olcina Cantos, J. (2002). Riesgos Naturales. Ariel Ciencia, Barcelona.

Ayala-Carcedo, F. J.; Durán Valsero, J. J. y Peinado Parra, T. (1988). Riesgos Geológicos. IGME, Madrid.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel Ciencia, Barcelona.

Ferrer, M.; González de Vallejo, L. I.; García López-Davalillo, J. C. y Rodríguez Franco, J. A. (2004). Pérdidas por terremotos e inundaciones en España durante el periodo 1987-2001 y su estimación para los próximos 30 años (2004-2033). Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid.

Francis, P. (2000). Volcanoes. Oxford University Press, Nueva York.

Goldberg, P. y McPhile, R. I. (2006). Practical and Theoretical Geochemistry. John Wiley & Sons Ltd.

González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Otero, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid.

Gutenberg, B. y Richter, C. F. (1954). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. (2ª ed). Princeton University Press.

McCalpin, J. P. (1996). Paleoseismology. Academic Press, San Diego.

Ortiz, R. (1996). Riesgo Volcánico. Excmo. Cabildo de Lanzarote.

Rodríguez Pascua, M. A. (1997). Estudio de la Paleosismicidad en Relación con el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en Emplazamientos de Instalaciones Nucleares. Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid.

Schmincke, U. H. (2005). Volcanism. Springer, Nueva York.

Stiros, S. y Jones, R. E. (1996). Archaeoseismology. Institute of Geology and Mineral Exploration and British School at Athens, Atenas.

Suárez, L. y Regueiro, M. (1997). Guía Ciudadana de los Riesgos Geológicos. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid.

Walter, M. (2008). Quaternary Dating Methods. John Wiley & Sons Ltd.

Yeats, R. S.; Sieh, K. y Allen, C. R. (1997). The Geology of Earthquakes. Oxford University Press, Nueva York.

El geólogo geoquímico

Javier Escuder Viruete

Investigador del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

En este capítulo se muestra cómo los geólogos geoquímicos utilizan las técnicas analíticas químicas para determinar la edad de la Tierra, predecir las erupciones volcánicas, demostrar que un cuerpo extraterrestre colisionó con la Tierra hace 65 Ma, observar los cambios atmosféricos durante millones de años y documentar los daños producidos en la superficie de la Tierra por la lluvia ácida y la contaminación.

El conocimiento del planeta Tierra a través de la geoquímica

El término geoquímica fue utilizado por primera vez por el químico suizo Schönbein (1799-1868), en 1838. A partir de su etimología se puede adivinar que el campo de la geoquímica resulta, de algún modo, de la unión de la geología y la química. Y así resulta ser, pero ¿cómo se combinan la geología y la química en la geoquímica? O ¿cuál es la relación entre ellas? Tal vez, la mejor explicación sea que la geoquímica utiliza las herramientas de la química para resolver problemas geológicos; es decir, los geólogos utilizan la química para conocer la Tierra y su funcionamiento.

La Tierra es parte de una familia de cuerpos celestes, nuestro sistema solar, que se formaron simultáneamente y están estrechamente relacionados. Por ello, el ámbito de la geoquímica se extiende más allá de la Tierra para incluir también el sistema solar. Las metas de la geoquímica son, por tanto, semejantes a las de otros campos de las ciencias de la Tierra; se difiere simplemente en el enfoque. Sin embargo, aunque el geoquímico tiene muchos aspectos en común con el químico, sus metas son muy diferentes. Por ejemplo, las metas del geoquímico no son elucidar la naturaleza de los enlaces químicos o

sintetizar nuevos compuestos, aunque estos estudios son a menudo de interés y uso en geoquímica. Aunque la geoquímica se considera una subdisciplina dentro las ciencias de la Tierra, abarca una temática amplísima. Resulta ser tan amplia que ningún geoquímico llega realmente a dominarla completamente, especializándose generalmente en uno o varios aspectos tales como la química de la atmósfera, la termodinámica geoquímica, la geoquímica isotópica, la química marina, la geoquímica de elementos trazas, la química de los suelos, etc.

El desarrollo de la geoquímica ha tenido lugar en la segunda mitad del siglo XX. Durante estos últimos 50 años, las ciencias de la Tierra han estado dominadas por una aproximación cuantitativa, que ha originado un conocimiento de nuestro planeta muy superior al existente anteriormente. La contribución de la geoquímica en este avance ha sido enorme. Gran parte del actual conocimiento y teorías de formación de la Tierra y el sistema solar proceden de la investigación geoquímica de los meteoritos. Mediante la geoquímica se ha podido cuantificar la escala de tiempo geológico, determinar la temperatura y profundidad de formación de los magmas y reconocer la existencia de plumas en el manto terrestre. Con la geoquímica se ha demostrado que los sedimentos depositados encima de la corteza oceánica pueden ser subducidos e introducidos en el manto, al igual que resulta posible conocer las temperaturas y presiones a las cuales se equilibran los variados tipos de rocas metamórficas, para después utilizar esa información, por ejemplo, en la determinación del movimiento en el pasado de grandes zonas de falla. A partir de la geoquímica se puede conocer la magnitud y velocidad del levantamiento y erosión de las cadenas de montañas en zonas de colisión continental. También mediante la geoquímica se pueden conocer los procesos de formación de la corteza terrestre, el momento de diferenciación de la atmósfera y su posterior evolución, así como los movimientos convectivos que experimenta el manto y que son el motor de la dinámica de placas. Desde la geoquímica se pueden conocer igualmente las bajas temperaturas que experimentó la superficie de la Tierra durante las pasadas glaciaciones, así como las causas que las originaron. Las evidencias de vida más antiguas, de hace unos 3.800 Ma, no proceden de restos fosilizados de organismos, sino de las trazas químicas de su actividad vital. Igualmente, las débiles evidencias de la existencia de vida en Marte, hace aproximadamente el mismo intervalo de tiempo, son también en gran parte químicas. Por lo tanto, no nos debe sorprender que instrumentos de análisis químico de materiales geológicos sean la parte clave de las sondas enviadas a otros cuerpos celestes, como Venus, Marte y Júpiter.

La geoquímica se sitúa también en el núcleo conceptual de las disciplinas concernientes al medio ambiente. Por ello, problemas ambientales como la lluvia ácida, el agujero de ozono, el efecto invernadero, el calentamiento global y la contaminación del agua y suelo son, en buena parte, problemas geoquímicos. La propia definición de

estos problemas requiere un conocimiento de sus aspectos geoquímicos. Análogamente, gran parte de los recursos no renovables, tales como los yacimientos de petróleo y las mineralizaciones de metales, se formaron mediante procesos geoquímicos. Cada vez más, la localización de nuevas fuentes de estos recursos requiere una aproximación estratégica desde la geoquímica. La localización e integridad de los espacios geológicos destinados para el almacenamiento de residuos, en particular los radiactivos, está también condicionada por la geoquímica. En síntesis, cada uno de los aspectos de las ciencias de la Tierra ha experimentado avances muy importantes utilizando la geoquímica.

Como la mayor parte de las ciencias, la geoquímica está en la actualidad muy condicionada por los avances tecnológicos. La tecnología ha proporcionado modernas herramientas geoquímicas que permiten estudiar hoy la Tierra de una forma impensable para los geólogos pioneros. En pocos minutos, la microsonda electrónica permite analizar granos minerales a la escala de micras y el microscopio electrónico ver el mismo mineral casi a la escala atómica (figura 1). Técnicas analíticas tales como la difracción de rayos X, la resonancia magnética nuclear y la espectroscopía Raman e infrarroja permiten examinar el ordenamiento y enlaces atómicos presentes en los materiales geológicos. Con ayuda de los espectrómetros de masas se puede determinar la edad de las rocas, o las paleotemperaturas de los océanos en el pasado geológico. La microsonda iónica posibilita incluso obtener la edad de partes de minerales a la escala de micras. Las técnicas analíticas como la fluorescencia de rayos X y la espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo permiten obtener análisis de elementos mayores —trazas y tierras raras de rocas—, en minutos, los cuales duraban días con las técnicas “clásicas” (figura 2). Todos estos análisis se obtienen hoy con una gran precisión y exactitud, impensable hace sólo un par de décadas. Los nuevos instrumentos y técnicas analíticas actualmente en

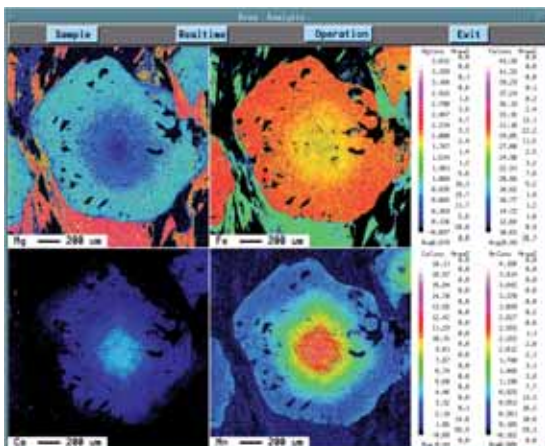


Figura 1. Mapa composicional de un granate de unos 3 milímetros de diámetro en una roca metamórfica de Salamanca, obtenido mediante una microsonda electrónica. La leyenda en color describe el contenido en Mg, Fe, Ca y Mn siguiendo el zonado químico del mineral.



Figura 2. Instrumentación analítica utilizada por el geólogo geoquímico en sus trabajos e investigaciones. (a) ICP-MS multicolector, composición isotópica de alta precisión de Nd, Pb y Hf; (b) Espectrómetro de masas de ionización térmica (TIMS), análisis isotópico de la alta precisión de Sr y Nd; (c) ICP-MS de alta resolución (Termo Finnigan, Element2), análisis elementales de alta precisión de cualquier elemento en solución a la escala sub-ppt, detrás hay acoplado un láser Nd-Yag 213 nm, que permite medir elementos seleccionados *in situ* por ablación láser y dataciones U-Pb por ablación láser; (d) espectrómetro de masas para gases nobles equipado con láser, datación de minerales por el método de Ar-Ar y láser Ar-Ar.

desarrollo, prometen incluso una mayor sensibilidad, velocidad, precisión y exactitud. Las actuales computadoras, con giga-hertzios de potencia, gigas y terabytes de memoria, y potentes herramientas gráficas, pueden realizar en pocos segundos cálculos termodinámicos que podrían haber costado hacer toda una vida. Considerados en conjunto, todos estos avances instrumentales y tecnológicos van a permitir al geoquímico aumentar en gran medida el conocimiento de la Tierra y su entorno cósmico.

Las aportaciones de la geoquímica

Las aportaciones de la geoquímica son claves en diversos campos de la economía, la salud pública y el medio ambiente. Cuando el geólogo recolecta una muestra de materiales geológicos como rocas, suelos, sedimentos, aguas y otros —con vistas a un estudio geoquímico—, normalmente no se pregunta si algún elemento químico está presente en concreto, ya que virtualmente va a contener todos los elementos naturales, en una cierta cantidad. Las cuestiones que busca resolver mediante el estudio geoquímico de la muestra son, sin embargo, si contiene un elemento químico específico en una concentración suficiente para su explotación minera, peligrosa para la salud humana, o si se combina formando una especie química perjudicial para el medio ambiente. El geólogo obtiene respuestas a estas cuestiones utilizando los resultados del análisis geoquímico de muestras de rocas apropiadas y representativas. Sin embargo, para resolver determinados problemas, el geólogo puede necesitar obtener sofisticados análisis de componentes químicos presentes en concentraciones muy bajas y en muestras extremadamente pequeñas, tales como isótopos radiactivos naturales en minerales cristalizados hace varios miles de millones años, fluidos asociados a mineralizaciones incluidos

dentro de minerales formados hace 300 Ma o burbujas de aire de algunos cientos de miles de años de antigüedad preservadas en los glaciares polares. Debido a que algunos elementos están presentes en concentraciones extraordinariamente bajas, éstos deben ser analizados mediante técnicas que posean límites de detección incluso más bajos, lo cual implica tener un excelente control de calidad en los laboratorios y la comparación de los resultados de los análisis con materiales estándar de referencia. Las actuales técnicas analíticas geoquímicas permiten determinar la presencia de virtualmente cualquier elemento químico a concentraciones del orden de partes por millón (ppm), billón (ppb) e incluso trillón (ppt).

Las principales aportaciones de la geoquímica son fundamentalmente dos: el conocimiento geológico de la Tierra y la distribución en ella de los elementos químicos. Mediante la geoquímica, los estudios geológicos han permitido conocer la historia de la Tierra —que ha quedado registrada en la composición química de las rocas que la forman—, calcular una edad absoluta para la Tierra de unos 4.600 Ma e incluso proponer la existencia en el pasado geológico de grandes eventos catastróficos procedentes del espacio. El conocimiento de la Tierra también procede del estudio de los procesos geológicos internos, como las erupciones volcánicas —cuyas condiciones físico-químicas antes y después de la erupción quedan detalladamente registradas en la composición de las partículas de cenizas emitidas y en los cristales presentes en el magma solidificado—. La geoquímica juega también un papel clave en el conocimiento de la formación de los depósitos minerales metálicos y en la acumulación de petróleo y gas y, por tanto, en la definición de estrategias para su exploración. De particular importancia aquí es el análisis geoquímico de los pequeños volúmenes de fluidos y gases fósiles, presentes como inclusiones en los minerales de las rocas.

La geoquímica también aporta datos fundamentales en el conocimiento medioambiental de la Tierra, en particular sobre los cambios globales ocurridos en el pasado geológico. Los cambios en el nivel del mar, la actividad solar e incluso —según algunos astrofísicos— las señales procedentes de supernovas muy distantes, han quedado registrados en los glaciares de hielo de la Antártida. La recopilación y estudio de este registro helado permite evaluar los cambios actuales en la atmósfera y predecir futuras tendencias. Las investigaciones de los gases retenidos en la nieve antes de convertirse por compactación en hielo, proporcionan una detallada información de la atmósfera en el pasado. Al analizar muestras procedentes de sondeos continuos de los glaciares se obtienen datos a lo largo de un intervalo específico de tiempo. Estos datos proporcionan una valiosa información sobre el tipo de clima y las fuentes de la humedad en el pasado, el variable espesor en el tiempo de la capa de hielo, la frecuencia y magnitud de los sucesos naturales, la actividad biológica en la superficie del océano y —producida más recientemente—, los niveles de contaminación humana.

Los geólogos utilizan las técnicas analíticas químicas para evaluar los daños producidos por la contaminación en la superficie de la Tierra, a la vez que ayudan a su prevención mediante la implantación de soluciones que permitan reducirla. Particularmente importantes aquí son las aportaciones del geólogo en el control químico de las aguas efluentes de áreas afectadas por explotaciones mineras, o de la degradación del patrimonio monumental que ocasiona la denominada lluvia ácida.

También en la reducción de emisiones de sulfuros y dióxidos procedentes de las centrales térmicas de carbón, determinando para su explotación selectiva aquellos yacimientos de carbón que producirán una menor contaminación. La determinación de estas áreas requiere analizar previamente el carbón a explotar, seleccionando los de menor concentración de cenizas, sulfuros y otros elementos tóxicos.

El conocimiento de la distribución de elementos químicos en la superficie de la Tierra permite evaluar los recursos naturales presentes en un determinado territorio. Esta información es, por ejemplo, aportada por los mapas resultantes de la geoquímica de sedimentos a lo largo de la red de drenaje, utilizados en la exploración regional de los recursos minerales. A escala local, la geoquímica permite detectar la existencia en el subsuelo de yacimientos minerales, a partir de la distribución cartográfica o espacial de ciertos elementos químicos relacionados con la mineralización, que son transportados disueltos en concentraciones muy bajas en las aguas subterráneas o fijados en otros minerales.

Los datos geoquímicos obtenidos en el marco de diversos programas científicos y proyectos técnicos, proporcionan la base para la construcción de las bases de datos geoquímicas por los organismos públicos con competencias geológicas y medioambientales. Estas bases de datos representan el conocimiento geoquímico de un territorio, el cual puede ser usado en múltiples aplicaciones relacionadas con la investigación, los recursos naturales, la salud pública y el medio ambiente. La elaboración de los mapas de la contaminación en los suelos —cuya fuente puede ser tanto natural como industrial—, posee una especial trascendencia en la seguridad y la salud pública.

Los clientes del geólogo geoquímico

Generalmente, en el marco de instituciones públicas el geólogo geoquímico estudia y proporciona soluciones a cuestiones concernientes a nuestro planeta Tierra, explora y evalúa los recursos minerales y construye bases de datos geoquímicos con el fin de mejorar la gestión y uso del territorio. Estos datos son aplicados por los centros de investigación, los órganos de la administración pública, la industria y las empresas privadas, para resolver los problemas e intereses de orden económico, social y ambiental.

Algunos ejemplos de estudios e investigaciones geoquímicas

Procesos geológicos: el volcanismo

A las altas temperaturas del interior de la Tierra las rocas pueden fundir formando el magma que, cuando encuentra un camino hacia la superficie, erupciona y forma los volcanes. El grado de explosividad de una erupción depende principalmente de la composición química del magma. De particular importancia son las relaciones entre la proporción de sílice (SiO_2), que controla la viscosidad del magma, y los componentes volátiles, como el agua y el dióxido de carbono y de azufre (CO_2 y SO_2). Los magmas pobres en sílice liberan normalmente los gases sin explosividad y dan lugar a coladas de lava que se mueven lentamente, como los volcanes de Hawai. Aunque estas erupciones pueden ser destructivas y ocasionar pérdidas materiales en edificios e infraestructuras, raramente producen pérdidas humanas.

Bajo ciertas condiciones, sin embargo, los magmas y las rocas encajantes son sometidos a elevadas presiones por el rápido desprendimiento de volátiles, ocasionando erupciones explosivas de gran poder devastador, como la sucedida en el volcán Vesubio, cerca de Nápoles, que destruyó las ciudades romanas de Pompeya y Herculano en el año 79. Una forma de medir los geólogos la energía liberada durante una erupción es el índice de explosividad volcánica, que gradúa de 1 a 5 y, entre otros parámetros, se basa en el volumen de material expulsado. Un valor máximo de 5 equivale a una explosividad muy grande, por ejemplo la erupción en 1991 del volcán Pinatubo en Filipinas (figura 3), que emitió unos 7 kilómetros cúbicos de cenizas y produjo 932 víctimas. Sin embargo, se trata de una erupción relativamente pequeña si se compara con las grandes erupciones de magmas silíceos ricos en volátiles, ocurridas a lo largo de la historia de la Tierra, como las registradas en el Valle (Nuevo México) o Yellowstone (EE UU), en las que se llegaron a emitir más de 2.500 kilómetros cúbicos de piroclastos riolíticos en un único flujo.



Figura 3. Izquierda: formación de una nube ardiente durante la erupción del Pinatubo en 1991, Filipinas; derecha: lluvia de cenizas volcánicas producidas durante dicha erupción.

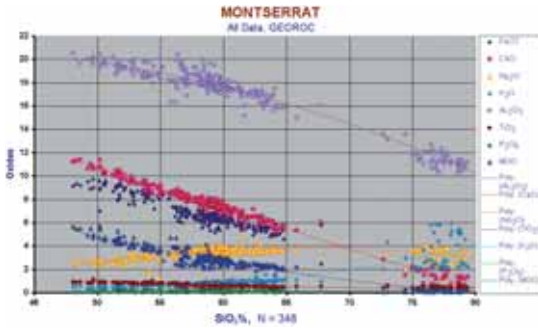


Figura 4. Diagramas de variación sílice versus óxidos de principales elementos mayores del estratovolcán de Montserrat (Antillas Menores), incluyendo datos previos a la erupción de 1996. Muchos de los datos con SiO₂ entre 75 y 80 por ciento son de piroclastos de caída o de surges riolíticas. El principal centro eruptivo de la isla ha estado peligrosamente activo en los últimos años ocasionando la evacuación de gran parte de la población.

El análisis químico del contenido de elementos mayores en los magmas es uno de los primeros datos a obtener en el estudio de los volcanes y su riesgo (figura 4). Para una determinada área, el análisis geoquímico de las rocas volcánicas emitidas previamente permite predecir el estilo y explosividad de futuras erupciones de composición similar. Un ejemplo de estas investigaciones son las realizadas en el volcán activo del Monte de Santa Elena (EE UU) por el USGS, en el que una potente y compleja secuencia de rocas volcánicas ha sido depositada en sucesivas erupciones espaciadas unos 100 años. Los geólogos geoquímicos han reconstruido la historia eruptiva del volcán mediante los estudios de campo y el análisis de estas rocas, demostrando que la actividad eruptiva del volcán está separada por largos periodos de calma. Como en otros volcanes, existen cambios sistemáticos en la composición de los elementos mayores y trazas de los magmas emitidos con el tiempo. La erupción más reciente que tuvo lugar en 1980 y produjo 57 víctimas como consecuencia de la explosión lateral del cono, además de avalanchas de derrubios y coladas de barro, parece ser el final de un ciclo químico que comenzó hace unos 500 años. Con esta información el geólogo puede predecir el estilo, frecuencia y el momento previo de una erupción futura. Las lavas o cenizas volcánicas emitidas en una nueva erupción pueden ser rápidamente analizadas químicamente y los resultados evaluados desde una perspectiva histórica. Sin embargo, aunque los cambios sistemáticos en la composición química de los magmas proporcionan una gran cantidad de información sobre el comportamiento de un volcán, todavía se necesita conocer mucho mejor los procesos relacionados con la formación del magma en niveles profundos de la Tierra y las causas que desencadenan su erupción.

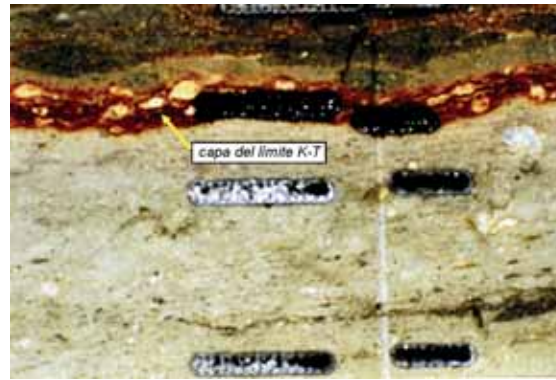
La catástrofe vino del espacio

Uno de los misterios que encierra la historia de la Tierra consiste en una capa de arcilla que se depositó encima de toda su superficie hace unos 65 Ma. La capa marca el límite K-T de fin del sistema Cretácico e inicio de la era Terciaria y coincide con el momento en el que se extinguió aproximadamente la mitad de las formas de vida en la Tierra, incluidas los dinosaurios. A principios de la pasada década, el científico Laureado al

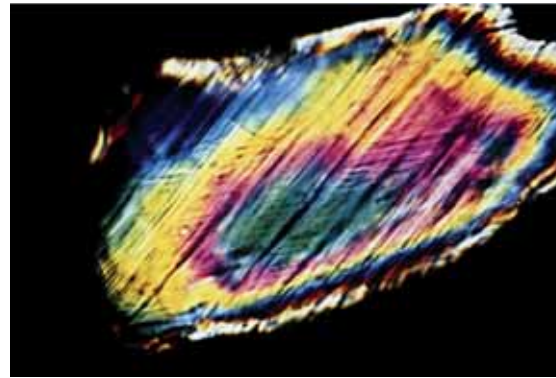
Figura 5. Arriba: evidencias geoquímicas presentes en la capa de arcillas del límite K-T en Caravaca (Murcia), indican que un asteroide impactó con la Tierra hace unos 65 Ma y posiblemente causó la extinción de una gran cantidad de formas de vida, incluidas los dinosaurios; (en medio) Trayectorias del láser (bandas negras) a lo largo de la capa rojiza de arcillas del límite K-T en Caravaca, anormalmente ricas en platinoides y muy posiblemente procedentes de una fuente extraterrestre; abajo: granos de cuarzo de 0,3 mm de diámetro procedentes del límite K-T, los cuales muestran al microscopio texturas formadas a muy elevadas presiones, típicas de zonas de cráter de impacto o de explosiones atómicas.



Nobel, Luis Álvarez, y sus colaboradores, descubrieron altas concentraciones del elemento iridio mientras analizaban muestras de un centímetro de espesor del límite K-T (figura 5 arriba). La coincidencia de los altos niveles de iridio con el clásico evento de extinción masiva del fin del Cretácico, les condujo a establecer una teoría para relacionar ambas observaciones. Propusieron que un asteroide de entre 6 y 14 kilómetros de diámetro impactó con la Tierra y, como consecuencia, enormes cantidades de material pulverizado fueron lanzadas a la atmósfera. En su investigación especularon que las cenizas emitidas impidieron la llegada de los rayos del Sol a la superficie y causaron una gran catástrofe medioambiental.



Investigaciones posteriores realizadas mediante sofisticadas técnicas de espectrometría de masas ICP por ablación láser, aplicadas a las 80 μm de espesor (el diámetro de un cabello) de la capa de arcillas del límite K-T han permitido obtener nuevos datos. El LA-ICP-MS tiene sensibilidad para detectar



todos los elementos químicos, en particular los platinoides que deberían aparecer en un impacto de asteroide. La resolución de la técnica permitió analizar pequeñas bandas del horizonte K-T (figura 5 abajo), obteniéndose justo en dicho nivel altas concentraciones de platinoides (>1 ppm), varios órdenes de magnitud superiores al normal. La mayor concentración de platinoides en el límite K-T evidencia también la validez de la teoría de que un cuerpo extraterrestre colisionó con la Tierra hace unos 65 Ma.

La geoquímica en la prospección de recursos minerales

Los metales son esenciales en la civilización actual, que invierte enormes cantidades de recursos en la localización de yacimientos de la mayoría de los elementos de la tabla periódica. En el mundo actual, por ejemplo, se consumen 72.000 toneladas de pasta amarilla de óxido de uranio al año y los países occidentales utilizan 1/4 de tonelada de acero por persona y año. En 2007, la producción anual de acero mundial excedió los 1.000 millones de toneladas y, en los próximos años, va a ser esencial localizar aquellas rocas que contengan una mayor concentración de Sc, Wo, Nb, Ta, etc.

En este contexto, las técnicas geoquímicas resultan ser claves en el conocimiento de la formación de los depósitos minerales y en su exploración de cara a su localización y posterior aprovechamiento industrial. Al determinar la composición química de cualquier roca de la superficie terrestre se obtienen pequeñas cantidades de elementos tales como oro, plata, platino, mercurio, cobre, cobalto, níquel, cromo, plomo, cinc, molibdeno, estaño y tungsteno. Sin embargo, ciertos procesos naturales poseen la capacidad de concentrar y purificar algunos elementos metálicos, llegando a formarse depósitos minerales que contienen entre 1.000 y 10.000 veces las cantidades de ellos presentes en las rocas ordinarias. En principio, cualquier proceso geológico que tiene lugar cerca de la superficie de la Tierra puede contribuir a la formación de un depósito mineral: la acción de los magmas fundidos; las altas temperaturas y presiones que forman las rocas metamórficas; los fluidos o vapores muy calientes; la erosión, transporte y sedimentación de las aguas superficiales; la climatología; la actividad biológica, etc. Los geólogos usan los principios de la química para tratar de comprender cómo estos procesos movilizan elementos desde las rocas normales, los transportan y los concentran para formar un yacimiento mineral. Los geólogos han desarrollado modelos que describen las características físicas y la composición química de cada tipo de depósito mineral, así como sus relaciones con el medio ambiente geológico, de forma análoga a las investigaciones que realizan los biólogos sobre la adaptación de un organismo a un particular nicho ecológico.

Muy probablemente, los depósitos minerales aflorantes en la superficie de la Tierra, más favorables para su explotación, ya han sido descubiertos. Por lo tanto, los nuevos yacimientos minerales a encontrar no son observables directamente. En estas condiciones, los geólogos han tenido que mejorar su conocimiento y desarrollar técnicas cada vez más sofisticadas para detectar los yacimientos ocultos en profundidad. Para localizarlos, se utilizan principalmente técnicas basadas en el modelo de formación de la mineralización y de detección de la aureola de dispersión desarrollada en el entorno del yacimiento. Siguiendo la analogía del trabajo de campo del biólogo, el examen de los restos de piel, pelo y forma de la cola de un animal enterrado le permiten deducir que se

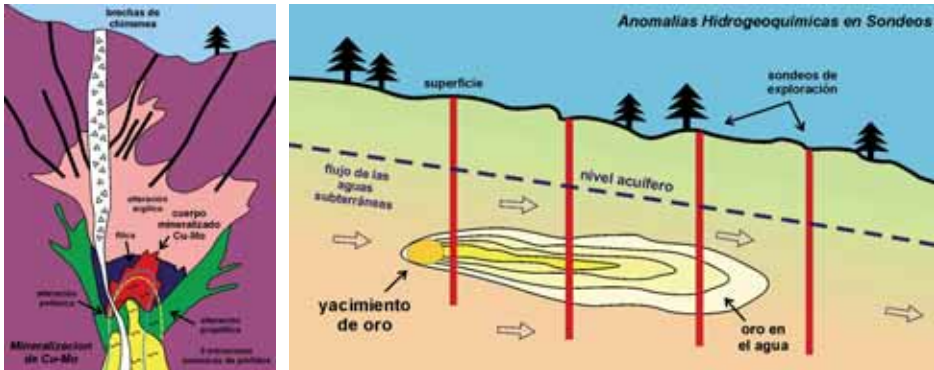


Figura 6. Izquierda: corte geológico esquemático de un modelo de mineralización de pórfido de cobre-molibdeno. La desgasificación explosiva de vapor y gases durante el enfriamiento de la intrusión origina la formación de chimeneas rellenas de fragmentos de roca, que se extienden cientos de metros hacia la superficie y frecuentemente contienen fragmentos del cuerpo mineralizado existente en profundidad; derecha: Los geoquímicos pueden muestrear agua de sondeos de exploración para detectar el halo de dispersión de elementos procedente de un depósito mineral.

trata del apéndice de un mamífero. Mediante avanzados análisis del ADN del tejido, el biólogo podría probar que la cola pertenece a una especie determinada de elefante y —en base a sus dimensiones— predecir fácilmente que el resto del cuerpo debería aparecer a un metro más de profundidad.

Muchos modelos de depósitos minerales utilizados por los geólogos no son tan avanzados como los utilizados por los biólogos para los elefantes, aunque se aproximan. Algunos yacimientos de cobre y molibdeno situados a profundidades de unos 500-1000 metros han sido descubiertos mediante afloramientos de sólo unos metros de longitud de ciertas rocas en superficie (figura 6 izquierda). Estos afloramientos consisten en chimeneas o diques subverticales de rocas brechificadas, que se extienden varios cientos de metros por encima del cuerpo principal de pórfido mineralizado. Debido a que no todos los depósitos de pórfidos contienen metales de interés económico, el geólogo debe estudiar los afloramientos en el campo, seleccionar muestras para analizar geoquímicamente, determinar así los metales que el pórfido puede contener y evaluar si merece la pena realizar sondeos.

Los yacimientos minerales cubiertos por algún recubrimiento sedimentario reciente resultan aun más difíciles de localizar, ya que están ocultos por rocas no relacionadas genéticamente. Sin embargo, estos yacimientos pueden liberar pequeñas cantidades de elementos relacionados con la mineralización, que son transportados y fijados en las rocas del recubrimiento. Las técnicas analíticas geoquímicas de alta resolución permiten detectar la presencia de estos elementos, aunque es necesario separar los movilizados desde el yacimiento mineral y los existentes en el recubrimiento. Para ello se utilizan actualmente dos métodos: el análisis de las aguas subterráneas y el estudio de los minerales capaces de fijar en su estructura los elementos movilizados desde la mineralización.

Las muestras de aguas subterráneas recolectadas en pozos, fuentes y sondeos pueden proporcionar pistas de la presencia de yacimientos minerales en profundidad. El flujo del agua subterránea es muy lento, oscilando de casi cero a unos 25 metros al año. Los flujos lentos dan lugar a un mayor tiempo de contacto del agua subterránea con las rocas y un posible depósito de mineral, permitiendo que pequeñas cantidades de metales sean disueltas y movilizadas. Para detectar oro u otros elementos en los halos o plumas de dispersión formados por el flujo del agua subterránea (figura 6 derecha) se requieren técnicas analíticas sumamente sensibles, que detecten concentraciones del orden de 1 ppb —e incluso menores— como la espectroscopía de absorción atómica. El otro método para detectar los elementos movilizadas por las aguas subterráneas consiste en estudiar los minerales del recubrimiento que los retienen. Durante el ascenso de las aguas subterráneas a superficie y su evaporación algunos elementos son fijados en ciertos minerales mediante enlace químico. Ordenados según su mayor fuerza de enlace, los minerales capaces de fijar a los elementos procedentes de la mineralización son los silicatos de aluminio hidratados (arcillas), carbonatos secundarios, óxidos de manganeso amorfos, y óxidos/oxi-hidróxidos de hierro. Para liberar los elementos movilizadas del mineral anfitrión se utilizan técnicas analíticas de extracción selectiva, las cuales facilitan la distinción de los elementos procedentes de fuentes distintas a las normales del recubrimiento. Así, la presencia de un depósito de oro en un mineral específico del recubrimiento puede ser indicada tanto por su presencia directa, como por la de ciertos elementos relacionados como arsénico y antimonio.

Cambios globales en el pasado geológico

Las inclusiones de aire atrapadas en el hielo de los glaciares pueden ser analizadas utilizando técnicas de espectrometría de masas acopladas a un láser de alta energía, permitiendo a los geoquímicos determinar la composición de la atmósfera de la Tierra en el pasado y predecir futuros cambios climáticos. Sin embargo, las muestras de hielo estudiadas sólo cubren los últimos 200.000 años, sin que se haya podido obtener información de épocas más antiguas. Recientemente los científicos han encontrado un nuevo medio donde analizar los niveles de oxígeno de la atmósfera en el pasado: el ámbar. La resina de las coníferas al fosilizar forma el ámbar, con la particularidad de haber podido atrapar insectos, pequeños animales y plantas, que quedan perfectamente preservados para su estudio en la actualidad (figura 7). Otro ejemplo del interés de los científicos por el ámbar estriba en la extracción del ADN de los organismos atrapados en él y que vivieron hace millones de años, tema de la novela y película de ciencia-ficción Parque Jurásico.

El ámbar también preserva pequeñas burbujas de aire atrapadas. El análisis de los gases en estas burbujas muestra que la atmósfera de la Tierra hace 67 Ma era más rica

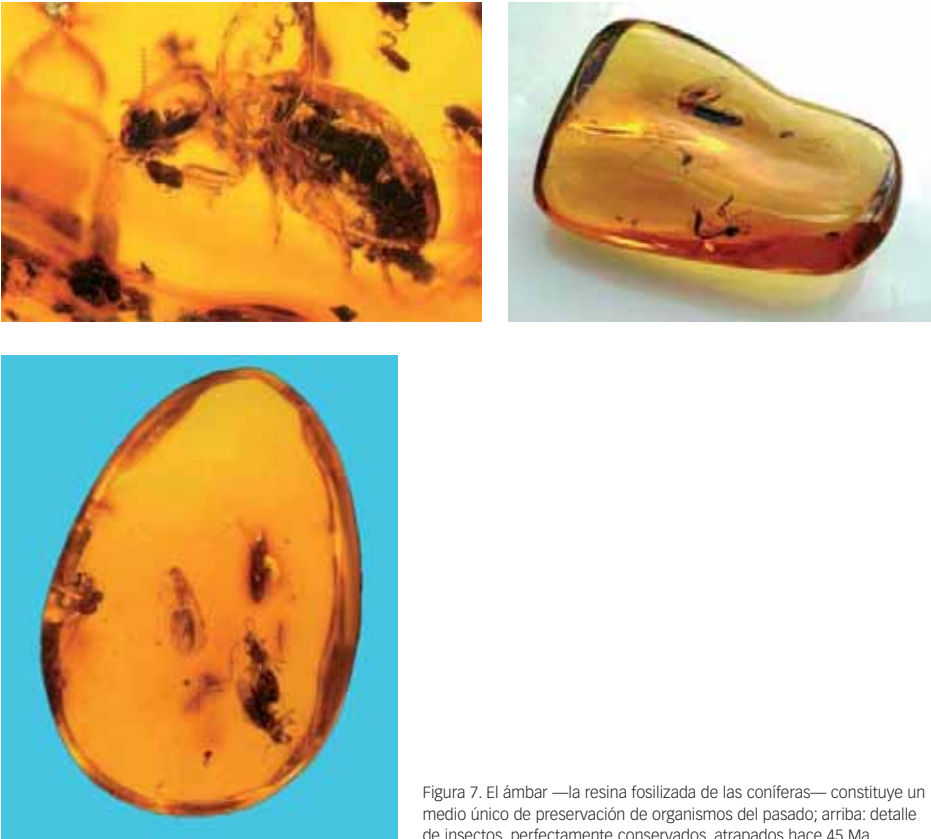


Figura 7. El ámbar —la resina fosilizada de las coníferas— constituye un medio único de preservación de organismos del pasado; arriba: detalle de insectos, perfectamente conservados, atrapados hace 45 Ma.

en oxígeno, con un 35 por ciento frente al nivel actual de 21 por ciento. Los análisis efectuados en burbujas de aire en el ámbar de edad cretácica, terciaria y cuaternaria, demuestran que el descenso en el contenido en oxígeno tuvo lugar gradualmente en la transición del Cretácico superior al Terciario inferior. Como este cambio en la composición de la atmósfera terrestre a los 65 Ma tuvo lugar al mismo tiempo que la desaparición de los dinosaurios, algunos investigadores han especulado si tuvo algo que ver en su extinción.

La contaminación

La pérdida del patrimonio monumental por la lluvia ácida

Además de afectar a las personas, la fauna y flora silvestre, la contaminación del aire también afecta a las rocas y suelos. Otro de los problemas que ocasiona, además, es la degradación de edificios y monumentos, especialmente si están contruidos por caliza o mármol, es decir, por carbonato cálcico casi puro. La contaminación ocasiona cambios

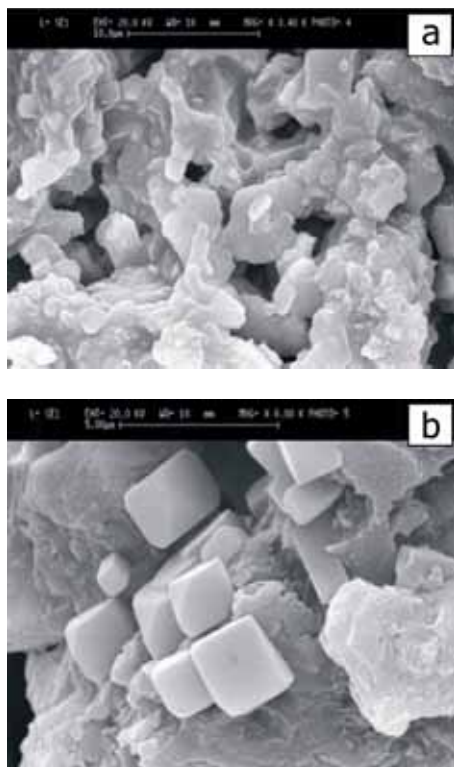


Figura 8. Microfotografías por MEB de minerales neoformados por la alteración de edificios históricos. (a) Cristales de yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; (b) cristales de halita, NaCl ; (c) esferas de fosfato de calcio. Estos minerales sugieren que los principales elementos indicadores de alteración son azufre, cloro y fósforo.

en la acidez del aire y el agua de lluvia, dando lugar a la denominada lluvia ácida, que afecta de dos maneras a las rocas carbonatadas utilizadas como material de construcción u ornamentación. La primera consiste en la acción seca del gas dióxido de azufre, emitido a la atmósfera durante la combustión de los combustibles fósiles. El SO_2 atmosférico produce ácido sulfúrico que reacciona con la calcita para formar yeso (figura 8). A medida que se deposita yeso sobre las superficies de la piedra, atrapa partículas y cenizas en suspensión formando pátinas negras que recubren los monumentos. El segundo efecto es la acción húmeda de la lluvia ácida. El agua de lluvia natural es una solución ácida débil y cualquier superficie de rocas carbonatadas está expuesta a una gradual erosión por disolución. Sin embargo, esta erosión es 10 veces mayor en las áreas afectadas por la lluvia ácida, particularmente en las grandes ciudades.

Los efectos de la lluvia ácida en las rocas carbonatadas de los monumentos han sido investigados recientemente utilizando modelos hidrogeoquímicos del proceso de alteración y técnicas analíticas de alta sensibilidad. Estas investigaciones, junto con experimentos realizados en el laboratorio, han permitido establecer que el mármol se erosiona entre 15 y 30 μm al año (espesor algo menor que un cabello), mientras que las calizas son disueltas entre 25 y 45 μm en el mismo intervalo de tiempo. Aproximadamente

el 20 por ciento de la erosión está causada por la lluvia ácida y el 80 por ciento restante es debido a la solubilidad natural de los carbonatos en el agua de lluvia. Las soluciones planteadas por los geólogos para evitar que la lluvia ácida nos robe poco a poco el patrimonio monumental, también están basadas en el control geoquímico de los procesos de alteración.

La química de las aguas procedentes de explotaciones mineras

Los geólogos utilizan las técnicas analíticas geoquímicas para conocer el grado de contaminación del agua procedente de áreas afectadas por explotaciones mineras. Puede tratarse de agua de calidad similar a la destinada para el consumo humano, o ser muy ácida y contener una alta concentración de metales pesados u otros elementos tóxicos. En general, cuanto mayor es la acidez del agua, menor es su calidad. Desde un punto de vista medioambiental, resulta muy importante caracterizar la química de los efluentes de explotaciones mineras, ya que pueden afectar dramáticamente a los organismos acuáticos y a la calidad del agua recibida por las poblaciones aguas abajo.

Debido a que la química de las muestras de agua puede cambiar rápidamente al manipularla o transportarla, el geoquímico debe medir muchos de sus parámetros rutinariamente en el campo. Uno de ellos es la acidez, que se describe mediante el pH de la muestra. Un pH de 2 significa que el agua tiene una alta concentración de iones de hidrógeno y resulta ácida, ya que convencionalmente el agua neutra tiene un pH de 7. El pH de las aguas procedentes del drenaje de las minas de Río Tinto (Huelva), de alto contenido en hierro y sulfuros polimetálicos, está entre 1.8 y 2.4 (figura 9), tratándose de

Figura 9. Izquierda: vista de la explotación minera de Río Tinto (Huelva); derecha: aguas efluentes del área de Río Tinto.



condiciones casi imposibles para la vida y que han interesado a los científicos de la NASA por sus posibles analogías con Marte. Otro de los parámetros medidos in situ es la conductividad eléctrica del agua, ya que constituye una estimación rápida de la cantidad total de sólidos en ella disueltos. Conductividades bajas de entre 10 y 200 microsiemens/centímetro son indicadoras de una calidad del agua que la hace apta para el consumo humano. Las medidas realizadas en aguas efluentes de explotaciones mineras varían normalmente entre 100 y 38.000 microsiemens/centímetro. La caracterización completa de las muestras de aguas efluentes de minas requiere también un conjunto de medidas instrumentales y analíticas, que son efectuadas en el laboratorio. Estas técnicas son: la cromatografía iónica que se usa para determinar la concentración de fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos en muestras acuosas; la espectrometría ICP-AES, que determina la concentración de elementos mayores y trazas; y el ICP-QMS, que se usa para determinar los niveles de ciertos elementos en líquidos por debajo de 1 ppm.

A partir de la composición química de los efluentes de explotaciones mineras, los geoquímicos han establecido que la causa más importante de la alta acidez del agua es la oxidación del mineral pirita catalizada por la acción de las bacterias. Esta acidez estimula también la disolución de otros minerales sulfuros, originando una alta concentración de metales como cobre y zinc. Debido a que resulta difícil o imposible cortar el drenaje procedente de zonas mineras, las soluciones propuestas consisten en disminuir la introducción de elementos tóxicos en el medio ambiente. Principalmente, se consigue impidiendo la acción de las bacterias, que aceleran la oxidación de la pirita, o mediante la extracción de elementos tóxicos neutralizando el drenaje. La experimentación ha demostrado que las áreas de mal drenaje o pantanosas actúan como un filtro al concentrar los metales movilizados en las aguas procedentes de minas. Por lo tanto, la construcción aguas abajo de balsas de decantación permite disminuir la contaminación. Sin embargo, la monitorización continua de los niveles de elementos tóxicos en estos lagos artificiales va a permitir conocer si se reduce con éxito su efecto, así como evitar cualquier impacto sobre la fauna silvestre que pueda intentar vivir allí.

La cartografía geoquímica de la superficie de la Tierra

La geoquímica de arroyos en la exploración de yacimientos minerales

La posibilidad de descubrir nuevos recursos minerales en la superficie de la Tierra ha ido progresivamente disminuyendo, paralelamente al desarrollo industrial mundial. Sin embargo, la demanda global de recursos minerales continúa creciendo y el reciclado de materiales sólo cubre en la actualidad una parte de nuestras necesidades. Por lo tanto, la obtención de buena parte de los minerales que son vitales para la sociedad está necesariamente basada en la exploración de yacimientos enterrados bajo la superficie.

Como ya ha sido descrito, algunas técnicas de localización de yacimientos están basadas en la identificación en sedimentos o suelos de las aureolas de dispersión de los elementos de la mineralización. Las aureolas de dispersión están definidas por la alta concentración de dichos elementos desarrollada en torno a un yacimiento, pudiendo extenderse largas distancias y, una vez identificada, utilizarse para encontrar la fuente siguiendo la dirección contraria al flujo. El ejemplo más familiar de una aureola es la dispersión de pepitas de oro en la red de drenaje de aguas debajo de un filón mineralizado con oro.

La estrategia actual consiste en la obtención de muestras de sedimentos de arroyos a lo largo de toda la red de drenaje de la zona de estudio, hasta quedar cartográficamente cubierta (figura 10a). El posterior procesado y análisis geoquímico de más de 40 elementos traza, metales e incluso platinoides, puede proporcionar indicios de la presencia de aureolas de dispersión de una gran variedad de tipos de yacimientos, aunque éstas sean poco patentes y situadas a una gran distancia. Para ello, se utilizan técnicas que detecten a niveles de incluso 1 ppb a elementos de interés económico, como oro, plata, cobre, plomo o cinc. Los análisis geoquímicos han de repetirse en todas las muestras, que en investigaciones de escala regional suelen ser miles. Para la definición de subáreas de interés minero donde concentrar en una segunda fase las investigaciones, se utilizan técnicas de análisis geoestadístico uni- o multivariable, que tienen en cuenta no sólo la concentración de un elemento en un punto sino también su correlación espacial respecto a las muestras de su entorno.

Inventario de los recursos minerales de un país

Uno de los objetivos que cubren los servicios geológicos de un país consiste en evaluar la potencialidad y reservas de recursos minerales del territorio, con el fin de obtener un inventario que sirva para establecer su gestión y planificación. También los organismos internacionales que destinan fondos de ayuda para los países en vías de desarrollo pueden contratar estos trabajos a los servicios geológicos de otros países, como es el caso de los Proyectos del Programa SYSMIN financiados por la Unión Europea, realizados por el IGME en la República Dominicana (figura 10b). Una parte de los trabajos consiste en el análisis geoquímico de suelos y sedimentos de arroyos, con el fin de determinar la presencia de anomalías locales que motiven la exploración de las compañías mineras.

Estableciendo relaciones entre datos geoquímicos, modelos de depósitos minerales, características geológicas regionales y contexto geodinámico, los geólogos pueden predecir la tipología de los yacimientos minerales presente en un área geográfica determinada. Los resultados de estos trabajos quedan plasmados en mapas geoquímicos,

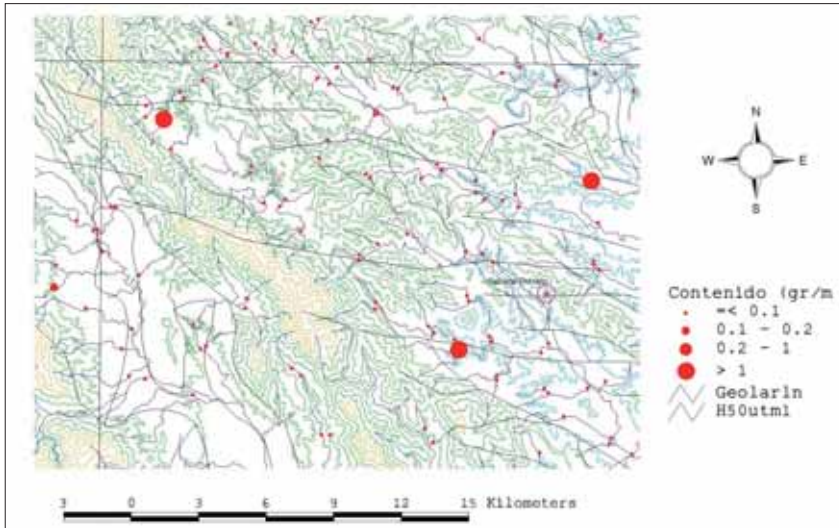
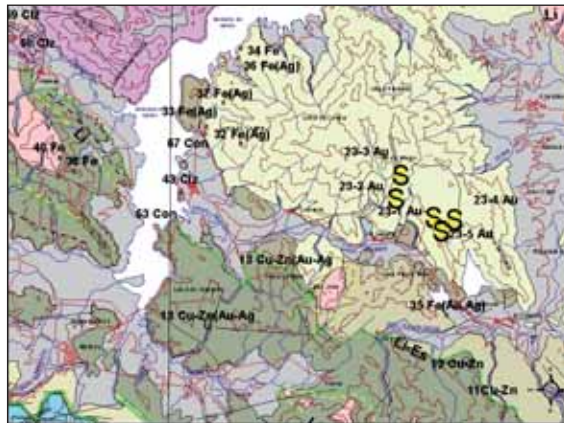


Figura 10. Arriba: mapa de contenidos en Au en bateas de sedimentos en un sector de la República Dominicana (IGME-Inypsa, Proyecto Sysmin). Los círculos de mayor tamaño señalan concentraciones de Au > 1 gr/ton; abajo: Mapa de recursos minerales de un sector de la República Dominicana (IGME-Inypsa, Proyecto Sysmin).



que resultan útiles a las instituciones públicas y privadas en la planificación de los usos del suelo y en la gestión del territorio. También ciertos mapas geoquímicos de metales pesados o elementos tóxicos, sirven tanto para la evaluación del recurso como la de su impacto ambiental. En este sentido, el marco regulatorio europeo y estatal específico de las actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados ha quedado establecido con el RD 9/2005. La información geoquímica resulta igualmente de gran importancia en la evaluación de la potencialidad de los recursos minerales de un área frente a otros recursos naturales o usos, como el agua, la agricultura de secano o regadío, la caza, el turismo, la calificación industrial o urbana del suelo o el valor paisajístico, así como la declaración de alguna figura de mayor o menor protección ambiental. En este proceso de evaluación, la información geoquímica proporcionada por los geólogos juega un papel fundamental.

Las fuentes de la contaminación industrial

Los mapas geoquímicos de elementos en los suelos proporcionan información sobre las fuentes naturales o industriales de la contaminación, importantes para la salud pública y la seguridad de la población. En otros casos, sirven para documentar los daños producidos por la actividad contaminante de una industria y la definición de actuaciones para su restauración ambiental. Un ejemplo de estos estudios geoquímicos encaminados a la determinación de las fuentes de la contaminación industrial son los realizados en el distrito minero de Almadén, localizado al sur de la provincia de Ciudad Real. El distrito minero de Almadén se extiende unos 300 km² y constituye la mayor concentración mundial de mercurio, cuya explotación ha dado lugar a un tercio de la producción mundial de este elemento. La minería de mercurio ha sido activa en Almadén desde épocas romanas hasta la actualidad prácticamente sin interrupción, excepto las causadas por desastres mineros (inundaciones, fuegos) o factores externos, como las guerras. Sin embargo, la explotación minera del mercurio durante más de 2.000 años ha dado lugar también a que el distrito de Almadén sea uno de los más contaminados del mundo.

Recientemente, Higuera et al. (2005) han obtenido elevados niveles de mercurio en los sedimentos de arroyos, suelos, agua, plantas y fauna acuática invertebrada del distrito de Almadén, al analizarlos mediante técnicas de espectroscopia de absorción atómica. Las concentraciones obtenidas están por encima de los niveles de calidad europeos establecidos (WHO, 2000) y espacialmente localizados en torno a las minas (San Teodoro, Las Cuevas), instalaciones metalúrgicas abandonadas (Almadenejos), o arroyos muy contaminados. Según estos autores, estos altos niveles de mercurio están ocasionados por una combinación de la dispersión geoquímica natural —derivada de la erosión de los depósitos minerales aflorantes— y de la actividad minero-metalúrgica, debida a la explotación, transporte, apilamiento y tratamiento industrial del cinabrio. La principal conclusión geoquímica del estudio es que ningún sistema ambiental (rocas, suelos, sedimentos, agua, atmósfera, biota) está libre de una fuerte contaminación por mercurio en el distrito de Almadén. De particular importancia son los elevados niveles de mercurio medidos en la localidad de Almadén, por encima de las recomendaciones de WHO (2000) y que afectan a unos 7.000 habitantes. La documentación y alcance de los daños producidos por una actividad extractiva contaminante sirve en este caso como base para su necesaria regeneración ambiental.

La calidad de los análisis

La definición y medición de cantidades desconocidas es una tarea fundamental en el campo de las ciencias de la Tierra y, en general, en cualquier otro campo científico. En geoquímica, las medidas son importantes porque nos advierten de peligros potenciales, como

la actividad volcánica o la contaminación ambiental, o nos ayudan a localizar y explotar adecuadamente nuestros recursos minerales, para poder seguir siendo competitivo en una economía hoy globalizada. Desde un punto de vista político, las medidas geoquímicas realizadas en muestras de materiales geológicos se utilizan para la toma de decisiones en temas tan importantes como el control de la calidad del agua para consumo humano, la prevención de la contaminación ambiental, la evaluación de los recursos minerales o la idoneidad de un macizo rocoso para el secuestro de CO₂. Por todo ello, resulta fundamental obtener medidas de la mejor calidad analítica posible, que no den lugar a conclusiones erróneas; una equivocación en las medidas puede influir en las decisiones tomadas sobre poner en peligro un hábitat animal, la exploración mineral, o la remediación de un problema ambiental.

Referencias bibliográficas

Higueras, P.; Oyarzun, R.; Lillo, J.; Sánchez-Hernández, J. C.; Molina, J. A.; Esbría, J. M. y Lorenzo, S. (2005). The Almadén district (Spain): Anatomy of one of the world's largest Hg-contaminated sites. *Science of the Total Environment* 356: 112-124.

Locutora, J.; Bel-Lan, A. y Lopera, E. (2002). Cartografía geoquímica multielemental en sedimentos de corriente en un contexto de arco isla volcánico. Aplicación al análisis de potenciabilidad metalogénica en una área de la República Dominicana. *Acta Geológica Hispánica* 36: 229-272.

WHO (1989). Mercury-environmental aspects, vol. 86. *Environmental Health Criteria*, Ginebra.

WHO (2000). Air quality guidelines for Europe. (2^a ed.) *European Series*, vol. 91. WHO Regional Publications, 9.

El geólogo geofísico

Enrique Aracil Ávila

Profesor del Área de Ingeniería del Terreno
Universidad de Burgos

Para qué sirve la geofísica

La geofísica es una ciencia que se dedica al estudio de la estructura física y las propiedades de la Tierra y, especialmente, a la aplicación de diferentes técnicas y métodos de investigación para el conocimiento de las propiedades físicas del subsuelo. Podría decirse que la geofísica es una rama común de la geología y la física. Comparte con la primera la búsqueda del conocimiento de las características de la Tierra y, con la segunda, la aplicación de métodos, técnicas y principios para la investigación de las características bajo superficie. En términos muy generales, el geólogo se sirve de la geofísica para investigar indirectamente el subsuelo, es decir, todo lo que se encuentra por debajo de la superficie y, consecuentemente, está oculto.

Por medio de la prospección geofísica se determinan, a partir de distintos aparatos, diferentes propiedades físicas y físico-químicas del subsuelo. El análisis de esas propiedades, la cuantificación de sus valores, la observación de la distribución de éstos, así como de la presencia o no de anomalías constituye, en conjunto, la investigación geofísica del subsuelo. Para poder "traducir" ese conjunto de valores físicos o físico-químicos a un modelo geológico será necesario contar con información geológica de contraste que, una vez integrada con los resultados geofísicos, permita conocer cómo es el subsuelo.

El geólogo geofísico se vale de su formación geológica y de sus conocimientos de las propiedades físicas y físico-químicas de los materiales para poder hacer esa "traducción"

anteriormente comentada con el criterio geológicamente más coherente. En este sentido, se podría decir que tiene una ventaja sobre el resto de especialistas en geofísica (físicos, ingenieros de minas) ya que su formación geológica es bastante mayor lo que se traduce en una mayor facilidad y coherencia geológica a la hora de interpretar los resultados geofísicos obtenidos en una determinada campaña. Probablemente, la base que tiene el geólogo geofísico sobre conocimientos físicos sea menor que la de los técnicos anteriormente citados pero queda compensada con creces esta ligera deficiencia por esa mayor capacidad de interpretar los resultados desde un punto de vista más geológico.

A la vista de lo aquí expuesto, la geofísica sensu stricto sirve para tener conocimientos sobre las características físicas de los materiales que forman el subsuelo y sobre las formas de análisis e interpretación de los resultados obtenidos tras la prospección geofísica de las diferentes propiedades de esos materiales. La prospección geofísica aplicada, como su propio nombre indica, no es más que la aplicación de la geofísica y los métodos geofísicos para realizar una prospección del subsuelo de una zona determinada.

El trabajo que realiza

El geólogo geofísico realiza un trabajo que podría considerarse de gran interés por dos motivos principales: por un lado, porque con su trabajo contribuye a la investigación de lo que está oculto y, por otro, porque su aportación es muy útil para numerosos especialistas en la materia, es decir, que tiene una contribución multidisciplinar.

Una vez realizadas estas dos indicaciones que permiten evaluar de forma muy generalista el trabajo del geólogo-geofísico, conviene concretar el tipo de tareas que lleva a cabo para poder conocer mejor su labor técnica y científica. El grueso de este trabajo consiste en la implantación de diferentes dispositivos sobre el terreno para, una vez obtenidas las lecturas pertinentes, procesar la información de estos datos e interpretarlos con el fin de aportar algo de "luz" al "oscuro" ambiente que es el subsuelo. Pero, como antes se ha indicado, esto es solamente una de las etapas, la correspondiente a la adquisición y procesado que, ni mucho menos, se presentan de forma aislada sino acompañada de otras etapas. En mayor o en menor medida, todas ellas contribuyen al trabajo final del geólogo geofísico y todas ellas son importantes.

Ordenadas de forma cronológica todas estas etapas, quedarían relacionadas de la siguiente manera:

1. Obtención de información sobre la zona de trabajo.
2. Selección del método geofísico más adecuado.

3. Campaña de adquisición de datos del subsuelo.
4. Procesado de los datos adquiridos.
5. Integración de toda la información e interpretación de los resultados.
6. Redacción del informe final.

1. Información sobre la zona de trabajo. Esta fase constituye, lógicamente, la primera de todas y es aquella en la que el geólogo geofísico indaga en las "bases de datos" de un área determinada con el propósito de obtener un primer conocimiento de las características de la zona donde se tiene que realizar el trabajo. Estas características que deben conocerse son muy variadas y podrían diferenciarse en características de tipo logístico y de tipo geológico.

Desde el punto de vista logístico, el geólogo geofísico no deberá descuidar nunca la labor de reconocimiento general de la zona que pretende investigar, es decir, conocer si hay accesos y cómo son; ver si el terreno es abrupto o es practicable; ver si hay vegetación que impida el emplazamiento de los dispositivos o si esta vegetación es lo suficientemente dispersa como para poder transitar entre ella.

Desde el punto de vista geológico, el geólogo geofísico tiene un trabajo muy importante: intentar conocer cuáles son los principales rasgos geológicos de la zona de estudio ya que es muy importante saber en qué rango de profundidades se encuentra el objetivo, si existe fracturación u otra serie de aspectos que deban tenerse en consideración a la hora de plantear los dispositivos, como es la dirección preferente de esa fracturación así como de la estratificación y del plegamiento. Para ello, deberá hacerse una recopilación de la documentación existente lo más exhaustiva posible. Esta fase puede llevar un cierto tiempo pero no cabe duda que la información que es capaz de aportar va a ayudar tanto que la duración de esta primera etapa no deberá preocupar si se extiende mucho. Lógicamente, una vez recopilado todo lo necesario deberá realizarse un análisis de toda esa información.

2. Selección del método geofísico. Consiste en la selección del método o de los métodos geofísicos que se consideran más adecuados para cubrir el objetivo. Lo más lógico y habitual es que esta fase de trabajo se pueda realizar pero, en numerosas ocasiones, el método prospectivo viene solicitado por el cliente lo cual implica una ventaja y un inconveniente. La ventaja se debe a que no hay que dedicar tiempo a esta fase pues ya viene cubierta por el cliente al ser éste el que propone o solicita directamente el tipo de investigación que desea para cubrir el objetivo. El inconveniente, sin embargo, radica en la dificultad o imposibilidad de cambiar el método solicitado por otro método geofísico distinto que se acomode mejor a las necesidades del objetivo o a las características de la zona de trabajo.

En cualquier caso, es conveniente que el geólogo geofísico analice las características del objetivo perseguido y determine cuál es el método o los métodos más adecuados para alcanzarlo, bien por el tipo de objetivo, bien por la profundidad a la que se espera encontrarlo o bien por las dimensiones del mismo o, incluso, por el presupuesto disponible para abordar los trabajos.

3. Campaña de adquisición de datos. Esta etapa podría considerarse como la de mayor importancia al ser el momento en el cual el geólogo geofísico procede a la obtención de los datos de campo que, tras su procesado, permitirá informar acerca de las características del subsuelo.

Para la realización de esta campaña de adquisición de datos en campo, el geólogo geofísico deberá realizar una serie de tareas complementarias, como es el caso, a veces de la solicitud y gestión de los permisos necesarios para poder realizar los trabajos en la zona de estudio. Aunque simplemente sean permisos de paso, en numerosas ocasiones el geólogo tiene que notificar su intención de hacer una serie de trabajos para evitar prohibiciones de ejecución de medidas que, con los equipos desplazados e, incluso, los dispositivos implantados en el terreno, a veces el geofísico se ve obligado a acatar. Si se trata de propiedades privadas, tendrá que comentar las intenciones con el propietario; si son públicas, con el ayuntamiento implicado. Si se trata de pasar o atravesar carreteras, en ocasiones deberá notificarlo al ayuntamiento, a la diputación o a la comunidad autónoma pertinentes. En definitiva, las gestiones administrativas no se escapan del ámbito de trabajo de un geólogo geofísico.

Otra de las etapas complementarias, pero que también hay que realizar de forma previa a los trabajos de adquisición de datos, es el desbroce de la maleza que, a veces de forma muy densa, cubre las zonas por donde hay que realizar las medidas, para lo cual habrá que realizar la apertura de vías de paso con las dimensiones suficientes como para permitir el paso del personal y los equipos.

La tercera actividad que el geólogo geofísico tiene que ser consciente que deberá realizar de manera complementaria es la señalización de los trabajos realizados en campo. Si bien actualmente hay una serie de herramientas que facilitan esta labor, muchas veces es recomendable, además, señalar las medidas realizadas (puntos de medida, comienzos y finales de perfiles, etc.) directamente en el terreno, como es el caso de las marcas con pintura reflectante y biodegradable, así como con cinta de obra. Las herramientas anteriormente indicadas que facilitan la señalización de la situación de los trabajos son, por ejemplo, los equipos portátiles receptores de señal GPS para obtención de las coordenadas más o menos exactas de los puntos medidos. También es posible indicarlo en mapas de diferentes escalas y, lo que suele ser más interesante, en fotografías aéreas.

La señalización lo más exhaustiva posible de la posición de los trabajos realizados es, por tanto, labor fundamental del geofísico, en tanto que unos buenos datos y unos buenos resultados carecerían de valor si no se encuentran referenciados correctamente.

Por lo que respecta a la medición de datos en campo propiamente dicha, que es lo que constituye la actividad principal del geólogo geofísico en esta fase del estudio, habría que destacar una serie de facetas importantes como son la calibración de los aparatos, la implantación de los dispositivos, la medición y la comprobación. Es lógico pensar que, para obtener buenas medidas en campo, es decir, medidas coherentes y reales, los aparatos de registro deberán estar calibrados, actividad esta que deberá hacerse de forma regular con el fin de mantener los sensores acordes con las prescripciones técnicas del fabricante.

Con los equipos calibrados, la actividad siguiente es la implantación de los dispositivos, es decir, situar sobre el terreno el aparato emisor, el receptor y los sensores de medida. Para ello, la base geológica del geólogo geofísico es fundamental para determinar las características geológicas del terreno y condicionar, con ello, la disposición sobre el terreno según un criterio geológicamente correcto, que deberá primar siempre sobre el criterio topográficamente más cómodo, ya que hay numerosas ocasiones en que lo geológicamente correcto es incompatible con lo topográficamente deseable. Los cambios bruscos de pendiente, los escarpes, los bancales, etc., son ejemplos de terrenos que deben evitarse para no introducir posibles elementos de error en los programas de procesado. Según estas indicaciones, el geólogo geofísico deberá tener siempre bien claro cuáles son las limitaciones de cada método, las circunstancias óptimas de cada dispositivo y las características de cada terreno y de cada objetivo con el fin de analizar, a veces directamente en campo, cómo realizar esa implantación de aparatos, cables y sensores.

4. Procesado de los datos. En esta etapa, el geólogo geofísico suele llevar un ordenador portátil al campo con el fin de realizar un primer procesado y comprobar, en una primera inspección, si los datos registrados son de buena calidad o han sufrido alteraciones de algún tipo que hayan causado la obtención de ficheros aparentemente erróneos. En este caso, este primer procesado consiste, realmente, en una revisión de la calidad de los datos geofísicos obtenidos. Una vez confirmado que los ficheros son aceptables, el geólogo geofísico los archivará para su posterior tratamiento en gabinete en lo que constituye el procesado final.

Este procesado requiere la aplicación de diferentes programas informáticos (en la actualidad resulta impensable la actividad manual de procesado de datos, fase que antiguamente llevaba mucho tiempo por la necesidad de comparar los datos con tablas, gráficos, estadillos, etc.). Estos programas suelen ser específicos de cada aparato o, en ocasiones, de

aplicación más generalista. En cualquier caso, el geólogo geofísico será conocedor de estos programas con el fin de poder sacar el máximo provecho de los datos obtenidos.

5. Integración de toda la información e interpretación de los resultados. Hasta esta fase podría decirse que las actividades desarrolladas pueden ser llevadas a cabo de forma aproximadamente equivalente tanto por físicos geofísicos, como por ingenieros geofísicos o por geólogos geofísicos, pero esta fase que se describe en este punto es ya de vital importancia que sea realizada o, cuando menos supervisada, por el geólogo geofísico, sin menoscabo de la formación que puedan tener los especialistas antes mencionados. La razón es que una labor de integración de toda la información existente del subsuelo para alcanzar la mejor interpretación geológica posible de los resultados parece lógico pensar que debe hacerse con una fuerte base de conocimientos de geología.

El geólogo geofísico deberá “echar el resto” en esta fase, que es primordial para llevar a cabo la “transformación” de los datos puramente físicos obtenidos en resultados geológicos, considerando que las variaciones que observe en los datos procesados pueden deberse a cuestiones geológicas como es el caso de los posibles cambios laterales de facies, variaciones de espesor por la situación dentro de la cuenca sedimentaria, la existencia de discordancias angulares y progresivas, etc.

6. Redacción del informe final. La labor de la redacción del informe final no debe ser considerada como la menos importante pues el geólogo geofísico deberá tener la suficiente soltura como para poder expresar cuáles han sido los trabajos realizados, describir la metodología empleada, desarrollar el capítulo correspondiente a los resultados obtenidos y expresar de forma clara y concisa las conclusiones a las que se ha llegado para poder establecer las pertinentes recomendaciones.

Todo esto en sí parece una obviedad pero es importante que el geólogo geofísico haga un esfuerzo por cuidar tanto la redacción como la presentación de los resultados. Para comprender y valorar estas indicaciones basta con no olvidar que la redacción del informe final constituye la exposición de todo el trabajo realizado en las fases anteriores.

Entre todo este conjunto de actividades que desarrolla el geólogo geofísico sería injusto no incluir otra labor que desarrolla en mayor o menor medida y es la actividad comercial. Es el técnico que mejor conoce lo que hace, cómo lo hace y para qué lo hace y, por tanto, es el técnico que mejor podrá “vender” su producto. La prospección geofísica goza de un buen concepto por muchos profesionales pero, al mismo tiempo, padece un desconocimiento, una “mala fama” e, incluso, un desprecio por parte de muchos. Es una tarea de gran importancia dar a conocer la existencia de la prospección geofísica y las posibilidades que ofrece así como sus ventajas e inconvenientes.

Los conocimientos que aporta

La actividad que es capaz de desarrollar el geólogo geofísico aporta una información de gran importancia para el geólogo, ya que se trata de una información muy variada y diversa sobre el subsuelo, justo la que necesita para complementar los datos que obtiene éste en los trabajos que realiza en superficie. Se trata de una información muy variada en tanto que procede de prospecciones muy diferentes.

Pero para que el geofísico pueda aportar esta información de gran ayuda para el geólogo necesita que esta ayuda sea mutua. Conviene recordar que la prospección geofísica es una herramienta que se vale de la geología para poder interpretar los datos con mayor precisión y, consecuentemente, facilitar resultados más concluyentes. Un simple corte geoelectrónico o un radargrama no aportan conclusiones tan resolutivas si no van acompañados de una interpretación desde el punto de vista geológico.

No obstante, aunque la situación más conveniente es el análisis de la información geológica de una zona conjuntamente con la información obtenida tras una campaña de prospección geofísica, la aportación de información "a ciegas" por parte del geólogo geofísico suele ser un método habitual, bien porque no existe información previa o bien porque no se dispone de ella.

Sin embargo, se puede exponer un tercer escenario y es precisamente el que resulta más perjudicial ya que todavía está muy extendida la idea de que debe ser el geofísico el que aporte la información sin "ayuda externa de la que pueda valerse para manejar los resultados a su conveniencia". El calificativo perjudicial lo es en tanto en cuanto se trata de un trabajo entre profesionales lo cual presupone seriedad y honradez en la investigación.

De un modo u otro, la aportación de conocimientos suele ser importante, tanto si es a escala regional como si es a escala más local. A partir de estudios regionales (como los realizados a partir de campañas de gravimetría, magnetismo, sísmica de reflexión, así como prospección eléctrica y electromagnética) el geólogo geofísico es capaz de aportar conocimientos, por ejemplo, acerca de la estructura que afecta y compartimenta una cuenca sedimentaria ya que se puede obtener un reflejo bastante fiel de disposición de las unidades geológicas, de la distribución de sus espesores, de la localización del depocentro, de la estructuración de la misma, etc.

Lógicamente, para ello es importante disponer de un conocimiento previo de los posibles espesores y naturaleza de las unidades geológicas que rellenan esa cuenca para poder ofrecer una información mucho más completa. Las técnicas más resolutivas (como

puede ser, por ejemplo, el caso de la sísmica de reflexión) permiten ver, incluso, términos evolutivos desde el punto de vista geológico ya que se pueden llegar a identificar secuencias sedimentarias, system-tracks, etc.

También, a partir de sus estudios realizados a escala tanto regional como local se puede llegar a determinar la presencia o no de fracturas, las características que las definen (anchura, desarrollo, contenido o no en agua, etc.), sus direcciones preferentes e inclinaciones y la posible compartimentación de una zona en bloques hundidos y elevados.

Tanto la información estratigráfica-sedimentológica como la información estructural son de gran ayuda para la hidrogeología ya que los conocimientos que aporta el geólogo geofísico no sólo facilitan la identificación acerca de la presencia, el espesor y la profundidad de posibles acuíferos sino también pueden aportar información sobre la calidad de sus aguas (es decir, si éstas pueden estar afectadas por la presencia de contaminación, por efecto de la salinización, etc.)

A una escala más reducida, por ejemplo, se puede determinar con mayor precisión la posición de planos de fractura, la profundidad estimada en el subsuelo de un determinado nivel de interés, la localización de sectores karstificados, etc. Ya a una escala más local, técnicas de prospección eléctrica y electromagnética son capaces de definir la trayectoria de canalizaciones o delimitar la extensión de una "pluma" de contaminación en el suelo o la identificación de "fugas" en una balsa o en un vertedero o la posición de una cavidad.

Herramientas que utiliza

Para alcanzar ese conocimiento de las características del subsuelo, el geólogo geofísico se sirve de una instrumentación variada tanto en cuanto a la técnica como en cuanto al diseño, la complejidad y la sofisticación. Pero para que la interpretación se aproxime lo más posible a la realidad, el geofísico deberá combinar los datos que le aporte esa instrumentación con tres herramientas muy particulares: la lógica, la experiencia y la prudencia. En cuanto a la lógica pues es una "herramienta" de constante utilización por los geólogos; por lo que respecta a la experiencia, para aplicar en todo momento la técnica geofísica más adecuada para cubrir el objetivo perseguido y hacer la mejor interpretación posible de los resultados. Por último, deberá emplear la prudencia a la hora de hacer esa interpretación de los resultados.

El conjunto de instrumentos que utiliza el geólogo geofísico es muy variable (resistímetro, gravímetros, sensores de muy baja frecuencia, etc.), en tanto que son muy diversas las propiedades físico-químicas que se analizan (diferencias en comportamiento eléctrico, diferencias de masa-densidad).

Al existir variaciones importantes en el comportamiento eléctrico de los materiales del subsuelo, se emplean resistímetro para control de la resistividad, es decir, de la propiedad que indica la mayor o menor capacidad de los materiales para conducir la corriente eléctrica a su través. Estos resistímetro, en su origen, eran aparatos manuales pero en los últimos años se han dejado, como no podía ser de otra manera, "contagiar" de los avances tecnológicos e informáticos y los fabricantes ofrecen desde entonces equipos totalmente digitales, con las consabidas ventajas que ofrece esta mejora en la tecnología. El empleo de resistímetro se lleva a cabo para campañas de prospección geoelectrica mediante sondeos eléctricos verticales o perfiles de tomografía eléctrica, por ejemplo.

También, el geólogo geofísico emplea equipos que se basan en el principio del electromagnetismo para determinar las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo. Estos equipos los emplea, por ejemplo, cuando se trata de campañas de sondeos electromagnéticos o campañas de prospección con geo-radar.

Los equipos sísmicos que utiliza el geólogo geofísico se basan en la medición de la velocidad de propagación de ondas sísmicas (o acústicas) en el subsuelo, tanto las que son refractadas en los contactos entre capas diferentes (sísmica de refracción) como las que son reflejadas en los mismos (sísmica de reflexión). Esta velocidad está condicionada, fundamentalmente, por la composición, el grado de compactación y la densidad de la roca.

Propiedades parecidas a estas últimas descritas son en las que se basa el método gravimétrico para el estudio de la estructura de una cuenca como para la búsqueda de cavidades (microgravimetría). Para ello se sirve de otro aparato, el gravímetro, que es capaz de medir diferencias de atracción gravitatoria de una masa conocida que se encuentra alojada de forma estanca en su interior.

Del mismo modo que se ha descrito para estos métodos geofísicos, existen otros aparatos de constante uso por el geólogo geofísico que se basan en otras propiedades de los materiales del subsuelo para analizarlos. Tal es el caso del magnetómetro (para hacer campañas de magnetometría), el VLF (para hacer campañas mediante ondas de muy baja frecuencia, very low frequency), etc.

Con qué profesionales se relaciona

El geólogo geofísico se relaciona con un gran número de profesionales que se encuentran vinculados, con mayor o menor intensidad, al terreno. Así, desde los paleontólogos y prehistoriadores hasta los arquitectos pasando por ingenieros de caminos y de minas, todos encuentran un lugar común en la geofísica.

Quizás esta afirmación necesite de una aclaración para su mejor comprensión y, al mismo tiempo, para ver el alcance de estas relaciones multidisciplinarias.

Para un geólogo estructural, por ejemplo, es muy importante conocer la estructura de una cuenca y de un macizo rocoso, el plegamiento y disposición de las capas, así como la presencia y orientación de fracturas. Pues bien, todos estos aspectos son, con mayor o menor precisión, detectables e interpretables por el geólogo geofísico a partir de los perfiles y mapas que puede generar con los datos geofísicos.

Del mismo modo que el conocimiento de la estructura de una cuenca es fundamental para el estructuralista, llegar a saber cómo es el relleno de esa cuenca, dónde está el depocentro, cómo son los materiales que la rellenan, cómo se distribuyen, de qué manera se distribuyen las facies, son incógnitas de necesaria resolución para un sedimentólogo y que son perfectamente abordables por distintos métodos geofísicos.

¿No le ayudaría mucho a un hidrogeólogo conocer dónde se encuentra el nivel freático, o dónde hay niveles permeables, a qué profundidad y en qué posición se pueden encontrar los niveles y las fracturas productivas, hasta dónde se extiende la cuña de intrusión marina? Sin duda, la relación entre este profesional y el geólogo geofísico sería muy productiva. Los conocimientos que puede aportar el geólogo geofísico en esta materia, como ya se ha visto en capítulos anteriores, son casi innumerables.

La minería, como dedicación del geólogo, del ingeniero de minas y del profesional, tampoco se aparta del ámbito de actividad del geólogo geofísico. Hay una serie de métodos geofísicos que tienen una directa aplicación a la prospección mineral. No debe olvidarse que la prospección geofísica surgió para dar cobertura y apoyo a la investigación de recursos energéticos (hidrocarburos) y minerales. Dentro de este campo están también las canteras, tanto de materiales destinados a áridos como a explotación como roca ornamental. Conocer hasta dónde extienden en profundidad, ver sus variaciones laterales, calcular sus reservas son objetivos de constante persecución por el geólogo geofísico.

¿No tiene un edificio un substrato rocoso sobre el que edificarse? ¿No suele haber cavidades, zonas alteradas o fracturas en ese substrato? ¿No hay que realizar una excavación para los niveles subterráneos? ¿No hay que poner apoyos constructivos sobre el terreno? ¿No hay edificios que sufren hundimientos? Cada vez es más frecuente encontrar sentados en una misma mesa de reuniones geólogos geofísicos y arquitectos para tratar de buscar soluciones a los problemas que se le plantean a éstos.

Del mismo modo, es cada vez más frecuente el reconocimiento de la ayuda que puede aportar el geólogo geofísico tanto a los ingenieros de caminos, canales y puertos como a los ingenieros técnicos de obras públicas. La caracterización de apoyos de frentes de presas, la predicción de los terrenos y fracturas a atravesar por un túnel, el diseño de la excavabilidad en una obra lineal y la resolución de problemas en puertos marítimos son incógnitas abordables por los geólogos geofísicos.

Una de las principales incógnitas que desea resolver un especialista en medio ambiente es la identificación de terrenos contaminados y la localización de la extensión de la "pluma" de contaminación. La legislación actual relacionada con suelos contaminados obliga al propietario de un terreno a descontaminarlo; conocer con anterioridad a un proceso de compraventa de fincas, solares y parcelas y si éstas están o no contaminadas evitará sorpresas desagradables al futuro comprador. Estos objetivos son, igualmente, abordables a partir de técnicas geofísicas y, consecuentemente, constituyen un campo en el que el geólogo geofísico tiene mucho que decir.

Aunque pudiera parecer extraño, también la policía y los jueces han necesitado en alguna ocasión del geólogo geofísico. Hay una serie de casos en los que se ha contado con la colaboración del geólogo geofísico tanto para su resolución (por ejemplo, para la búsqueda de montañeros bajo la nieve de avalanchas) como para dictaminar una sentencia.

¿Quiénes son sus principales clientes?

Los clientes para los que trabaja el geólogo geofísico son muy variados ya que van desde organismos públicos hasta particulares, pasando por empresas privadas. El caso de los organismos públicos de carácter nacional, como puede ser el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se convierten en clientes potenciales en tanto que pueden (y suelen) solicitar el apoyo tecnológico de geólogos geofísicos en proyectos de investigación de determinadas zonas. También sucede lo mismo cuando se trata de ministerios, como por ejemplo, el Ministerio de Fomento, con cuyos presupuestos se costean los proyectos de infraestructuras de ámbito nacional (como es el caso de las redes de carreteras, autovías y autopistas, los trazados de las líneas férreas y de líneas de alta velocidad, etc.). En el caso del Ministerio de Medio Ambiente suceden situaciones similares cuando, por ejemplo y por enmarcarlo en una situación muy actual, se puede colaborar en la parte correspondiente de los programas nacionales de diseño y construcción de las redes piezométricas de las cuencas hidrográficas. Dentro de este ámbito estatal destacan asimismo las Confederaciones Hidrográficas, las cuales pueden convertirse en clientes potenciales, por ejemplo, con la colaboración con medios geofísicos dentro de los programas nacionales de los programas nacionales de diseño y construcción de las redes piezométricas, o para temas relacionados con los embalses para regadío.

También el geólogo geofísico puede contar con clientes como las administraciones autonómicas, es decir, diversas consejerías, como es el caso, por ejemplo, de las correspondientes consejerías de Agricultura (para participar en proyectos de investigación hidrogeológica para localizar recursos en el subsuelo capaces de paliar las necesidades de regadío de una comarca determinada); o de las correspondientes consejerías de Medio Ambiente (colaborando en proyectos de investigación para control de la extensión de la contaminación de suelos y de acuíferos); o de las correspondientes consejerías de Fomento (como sucedería en el caso de la participación en proyectos de infraestructuras).

A una escala más próxima, también son clientes potenciales las diputaciones provinciales, que tienen competencias en la mayoría de los municipios de cada provincia y, consecuentemente, se sirven de los conocimientos de los geólogos geofísicos para integrarlos en proyectos de emergencia en periodos de sequía para investigar nuevos acuíferos en zonas poco explotadas o con necesidad de recursos. Lo mismo sucede en las colaboraciones para apoyo a problemas geotécnicos que afecten a determinadas infraestructuras o a la construcción de nuevas redes de abastecimiento así como a la participación en las primeras fases del diseño de vertederos o el control de posibles fugas de los mismos.

Ya en el grado de mayor cercanía, los organismos públicos locales, como los ayuntamientos, suelen requerir, habitualmente, los servicios de geólogos geofísicos, por ejemplo, en los proyectos de captación de aguas subterráneas.

Lo mismo sucede con universidades y con centros de investigación, como podría ser el caso del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) que se convierten en clientes potenciales cuando el geólogo geofísico, o su empresa, se convierten en socios tecnológicos de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+i).

En cuanto a las empresas privadas, la diversificación de clientes es enorme en tanto que los objetivos que son abordables a partir de la prospección geofísica son muy variados. Los sectores del tejido empresarial susceptible de necesitar los servicios del geólogo geofísico son diversos como también es cambiante el orden de prioridad de esos clientes: dependiendo del momento, se presentan como prioritarios los proyectos para control y resolución de los efectos de una sequía prolongada (desaladoras, trasvases), o los proyectos de infraestructuras estratégicas (carreteras, líneas ferroviarias de alta velocidad, cementerios radiactivos), proyectos medioambientales (descontaminación de suelos, control de intrusión marina, vertederos), construcción (geotecnia, obra civil, búsqueda de recursos, como los áridos o la roca ornamental), etc. Son precisamente esos momentos en los que las consultoras y las empresas de ingeniería, así como las empresas

del ramo de la construcción o las empresas extractivas de áridos y compañías fabricantes de cemento, por ejemplo, canalizan una parte de sus presupuestos y, consecuentemente, se convierten en los principales clientes para el geólogo geofísico.

Referencias bibliográficas

Por lo que respecta a las referencias bibliográficas de las que se nutre el geólogo geofísico, como sucede en casi la totalidad de las disciplinas técnicas y científicas, son publicaciones extranjeras y apenas hay textos traducidos al castellano. Con esta premisa ya asumida se relacionan a continuación los trabajos más destacados tanto por ser los más relevantes, los más generalistas o los más actualizados. La mayor parte de ellos hacen referencia a la geofísica aunque son más recomendables para el geólogo geofísico los trabajos de prospección geofísica aplicada a objetivos diversos.

Aracil, E. (1995). Testificación geofísica: Una herramienta para la inspección de sondeos hidrogeológicos. VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla.

Aracil, E. (2000). Inspección, control de calidad, envejecimiento y regeneración de pozos. Olmo, M. y López-Geta, J. A. (eds.). Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología, IGME, Madrid, 49-59.

Aracil, E. (sin publicar). Registros geofísicos. Aspectos aplicados. Nuevas técnicas de construcción de pozos en terrenos no consolidados. Fermín Villarroya. Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español.

Astier, J. L. (1975). Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Paraninfo, Madrid.

Beck, A. E. (1991). Physical Principles of Exploration Methods. (2ª ed.). Wuerz, Winnepeg.

Bengt Sjöre (1984). Shallow Refraction Seismics. Champman and Hall, Londres.

Blakely, R. J. (1995). Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press.

Bullen, K. E. (1985). An introduction to the theory of seismology. (3ª ed.). Cambridge University Press, Nueva York.

Cantos Figuerola, J. (1987). Tratado de prospección geofísica aplicada. (3ª ed.). Escuela de Minas, Madrid.

Chuvieco Salinero, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. (3ª ed.). Ediciones Rialp, Madrid.

Dobrin, M. (1960). Geophysical Prospecting. MacGraw-Hill, Nueva York.

Estrada Lorenzo, F. (1996). Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-rádar aplicación a obras Civiles. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX Madrid. Ministerio de Fomento.

Garland, L. D. (1965). Introduction to Geophysics. Mantle, core and crust. (2ª ed.), Sanders, Filadelfia.

Grant, F. S. y West, G. F. (1965). Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill, Nueva York.

Griffiths, D. H. y King, R. F. (1972). Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (traducción y notas de Angel Río de la Cruz). Paraninfo, Madrid.

Griffiths, D. H. y King, R. F. (1981). Applied geophysics for geologists and engineers: the elements of geophysical prospecting. (2ª ed.), Pergamon Press, Oxford.

Gupta, Ravi P. (1991). Remote sensing geology. Springer, Berlín, Barcelona.

Hatton, L.; Worthington, M. H. y Makin, J. (1986). Seismic Data Processing. Blackwell Science.

Kearey P. y Brooks, M. (1991). An Introduction to Geophysical Exploration. (2ª ed.) Blackwell Science.

Lille, R. J. (1999). Whole Earth Geophysics. Prentice Hall, Nueva Jersey.

Lorenzo, E. (1996). Prospección Geofísica de Alta Resolución mediante geo-rádar. Cedex, Madrid.

Lowrie, W. (1997). Fundamentals of geophysics. Cambridge University Press.

Miguel, L. de (1980). Geomagnetismo. (3ª ed.). Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

Milson, M. (1991). Field Geophysics. Geological Society of London Handbook. John Wiley & Sons, Nueva York.

- Mirónov, V. S. (1977). Curso de prospección gravimétrica. Reverté, Barcelona.
- Officer, C. B. (1974). Introduction to theoretical geophysics. Springer, Nueva York.
- Orellana, E. (1974). Prospección Geoeléctrica por Corriente Continua y Campos Variables. Paraninfo, Madrid.
- Parasnis, D. S. (1970). Principios de geofísica aplicada. Paraninfo, Madrid.
- Plata, J. L.; Alonso, T.; Alberdi, R. y Aracil, E. (1996). Testificación geofísica de sondeos mecánicos: divulgación y desarrollo metodológico de esta técnica. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, Nueva York.
- Rodríguez Santana, Á. y Marrero Díaz, Á. (sin publicar). Problemas de Geofísica propuestos, resueltos y comentados. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Sharma, P. R. (1997). Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press.
- Sleep, N. H. y Fuyita, K. (1997). Principles of Geophysics. Blackwell Science.
- Smith, P. J. (1975). Temas de Geofísica. Reverté, Barcelona.
- Shearer, P. M. (1999). Introduction to Seismology. Cambridge University Press.
- Serra, O. (1985). "Diagraphies Differees". Bull Cent. Rich. Explor. -Prod. Elf-Aquitaine.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P. y Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics. Cambridge University Press.
- Trigueros Tornero, E. (1993). Introducción a la investigación y prospección minera. Universidad de Murcia.
- Udías Vallina, A. y Mezcuca Rodríguez, J. (1997). Fundamentos de geofísica. Alianza, Madrid.

Patrimonio geológico y geodiversidad

Juan José Durán Valsero

Luis Carcavilla Urquí

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Introducción

El concepto de patrimonio geológico es relativamente reciente. Desde hace varias décadas, se considera patrimonio geológico el conjunto de enclaves naturales, básicamente de carácter no renovable —aunque no exclusivamente—, tales como formaciones rocosas, estructuras y acumulaciones sedimentarias, formas, paisajes, yacimientos minerales o paleontológicos, lugares hidrogeológicos o colecciones de objetos geológicos de valor científico, cultural o educativo cuyas características, sobre todo las relativas a su exposición y contenido, permiten reconocer, estudiar e interpretar la evolución de la historia geológica que ha modelado una determinada región y, en última instancia, de la Tierra (ITGE, 1992).

El patrimonio geológico es una parte importante del patrimonio natural. No obstante, en los inicios de la conservación de la naturaleza, tanto en España como fuera de ella, la geología jugó un importante papel. Los aspectos geológicos, y en especial los geomorfológicos, fueron un factor determinante para la creación de los primeros parques nacionales en Estados Unidos a finales del siglo XIX. Algo similar ocurrió en los primeros pasos dados en materia de conservación de la naturaleza en España en las primeras décadas del siglo XX, al ser declarados, en 1918, los primeros parques nacionales españoles en dos enclaves de significación geológica tan patente como Covadonga (Asturias) y Ordesa (Huesca). A esto hay que sumar el importante papel que jugaron los geólogos en estos procesos de declaración. De hecho, fue precisamente un geólogo, Eduardo Hernández Pacheco, quien impulsó de manera decisiva, desde la Comisaría de



Parques Nacionales, la creación de algunos de los primeros espacios protegidos españoles, muchos de ellos con un fuerte contenido geológico. Promovió el establecimiento de figuras normativas para ciertos lugares de interés geológico, como los Sitios y Monumentos Naturales de Interés Nacional en 1927, mediante los cuales se protegieron enclaves de gran significación geológica como la Ciudad Encantada (Cuenca) (figura 1), el Torcal de Antequera (Málaga) o la Pedriza del Manzanares (Madrid), junto a otros espacios de interés natural y menor protagonismo geológico. Sin embargo, en aquellos momentos iniciales de la geoconservación en España, el concepto de patrimonio geológico se reducía a una colección de "rarezas" geológicas, sin conexión alguna entre sí y con escasa representatividad de los principales procesos de la historia geológica del país. Hubo que esperar hasta los años setenta u ochenta para que se sentaran las bases del patrimonio geológico tal y como hoy lo conocemos. La denominada Declaración de Digne (1991), fue uno de los pasos decisivos en este sentido, ya que

situó a los lugares de interés geológico en su contexto adecuado, como elementos destacados de la historia geológica de la Tierra.

Geología y patrimonio geológico

El estudio del patrimonio geológico figura entre las más recientes líneas de investigación incorporadas al ámbito de la geología. Es el resultado de una nueva manera de entender el papel del hombre en relación con la Tierra, acorde con la visión cada vez más generalizada de la sociedad, que ya considera un derecho, una necesidad y un deber proteger el medio ambiente, promover un desarrollo sostenible y dejar para las generaciones futuras un entorno bien conservado, incluyendo los elementos geológicos de interés excepcional.

El patrimonio geológico está formado por aquellos lugares o puntos de interés geológico cuyo valor geológico les hace destacar del entorno circundante, fundamentalmente por su interés científico y/o didáctico. Se incluyen, por tanto, lugares que sirven como modelo, lugares que muestran procesos geológicos únicos o excepcionales, zonas que muestren un patrón geológico singular o representativo, lugares que muestren la relación entre el hombre y el medio geológico que lo rodea (generalmente aspectos relacionados con la geología ambiental), y elementos representativos de la geología (e incluso del paisaje geológico) del territorio. Pero también ejemplares extraídos de su lugar de origen se convierten en bienes museísticos: es el llamado patrimonio geológico mueble.

El patrimonio geológico es, al fin y al cabo, una selección de formas, materiales, procesos y elementos geológicos que, en términos de singularidad y representatividad, definen la geología de un determinado territorio. Efectivamente, la geología, con su carácter de ciencia histórica, es la que da sentido al patrimonio geológico. Éste debe explicar la historia geológica y ser representativo de la geodiversidad de la región donde se encuadra. Por otro lado, las diferentes disciplinas de las ciencias de la Tierra proporcionan las diversas perspectivas que deben servir para elegir o destacar los elementos geológicos que deben formar parte del patrimonio geológico regional. De esta manera, puede hablarse de patrimonio estratigráfico, patrimonio geomorfológico, patrimonio tectónico, patrimonio hidrogeológico, patrimonio mineralógico, patrimonio paleontológico, etc., en función de las diferentes disciplinas que componen las ciencias geológicas.

Fruto del interés por el patrimonio geológico han surgido más recientemente ciertos términos relacionados con su estudio, protección o con otros aspectos. Uno de ellos es el de geodiversidad, término nacido en 1991 originalmente como análogo al de biodiversidad. Este término es cada vez más común en la literatura científica y de conservación, y la primera referencia en español es más reciente aun (Durán et al., 1998). Otro término que se impone cada vez con más frecuencia en la literatura científica es el de geoconservación, referido al conjunto de medidas y acciones encaminadas a mantener o recuperar el valor geológico de un determinado lugar.

La geología sirve de base para conocer la geodiversidad de una zona, para identificar los enclaves que constituyen el patrimonio geológico de un determinado territorio y para establecer las medidas de gestión del mismo, así como para diseñar la recuperación de zonas degradadas. Y es que no hay que olvidar que el patrimonio geológico y la geodiversidad son propiedades intrínsecas del territorio e importantes atributos relacionados con el interés geológico de una determinada región. Como propiedades del territorio que son, guardan cierta relación con otras disciplinas como la geografía, el

paisaje, la climatología e incluso aspectos culturales y socio-económicos. Sin embargo, y a pesar de los estrechos vínculos que puede mantener con todos ellos y de algunos enfoques muy particulares realizados recientemente, el patrimonio geológico, la geodiversidad y la geoconservación se limitan a analizar aspectos fundamentalmente geológicos, y desde esta perspectiva debe enfocarse su estudio.

¿Qué aporta el estudio del patrimonio geológico a la geología?

Como ya se ha comentado, el patrimonio geológico surge de la concepción ambiental y ecológica de la geología. Es otra manera de ver la realidad geológica, en la que los elementos geológicos ya no sólo se valoran por su potencial como recurso (cuya explotación suele llevar necesariamente asociada su destrucción), sino también como un bien patrimonial cuya conservación y puesta en valor es prioritaria. Es lo que algunos autores han denominado geología ecológica (Durán et al., 1998), que más que una nueva disciplina pretende ser una actitud o enfoque que permita percibir la realidad geológica de una nueva manera.

La finalidad última de los estudios de patrimonio geológico es la conservación de los elementos que lo componen, más aun, teniendo en cuenta que la mayoría de los enclaves de alto valor geológico son recursos no renovables, por lo que su destrucción es, si llega a producirse, irreversible. Pero para que la conservación sea una realidad y se haga en términos efectivos, previamente será necesario poner de manifiesto su singularidad, valor, relevancia y fragilidad.

La conservación del patrimonio geológico parte de la idea de que los elementos que lo constituyen poseen un determinado valor intrínseco, pero también una fragilidad que los hace vulnerables. Por lo tanto, la geoconservación se basa en el conocimiento del valor de los lugares a conservar, sus características intrínsecas, su fragilidad, los procesos genéticos que intervinieron, las amenazas presentes o potenciales de degradación y su posible evolución en el futuro. La geología "convencional" pocas veces ha atendido a estos aspectos, por lo que el estudio y conservación del patrimonio geológico no sólo requiere un nuevo enfoque, sino también el establecimiento de unas técnicas que permitan definir la vulnerabilidad de los elementos geológicos, el riesgo que sufren de degradación y las amenazas para su conservación. Además, la conservación de los elementos geológicos tiene una peculiaridad: a menudo su interés se pone de manifiesto por la existencia de una transformación antrópica que permite observar su estructura interna, como por ejemplo en una cantera o en el talud de una carretera. Por ello, la geoconservación a menudo requiere enfoques que difieren de los utilizados en la protección de otros aspectos del medio natural.

Como ya se ha comentado en la introducción, el patrimonio geológico guarda una estrecha relación con los espacios naturales protegidos. Esta relación se basa en que el patrimonio geológico forma parte del patrimonio natural y, por lo tanto, es susceptible de ser protegido mediante las leyes y mecanismos de conservación de la naturaleza. Surge, por tanto, todo un entramado legal en el que los geólogos deben jugar un importante papel y que requiere profesionales familiarizados con los aspectos relacionados con las normas de protección del medio natural.

Por otro lado, el interés de la sociedad hacia los aspectos naturales hace que cada vez haya una mayor conciencia conservacionista, y unida a ella, un creciente interés por conocer y visitar lugares de alto valor natural, incluidos los de interés geológico. El geoturismo es una realidad y alcanza cifras tan espectaculares como los 100.000 visitantes al año que recibe la reserva geológica de la Provenza Alta (Francia) (Martini, 2000), los 500.000 visitantes anuales de la cueva de Nerja (Málaga), o los casi cuatro millones de visitantes del Parque Nacional del Teide (Tenerife) atraídos, fundamentalmente, por el espectacular paisaje volcánico de este lugar. Por ello, el patrimonio geológico se está convirtiendo en un importante recurso que puede suponer un importante motor socioeconómico para el desarrollo local. En esta línea, se han puesto en marcha recientemente en España numerosas iniciativas, tales como la creación de geoparques o parques geológicos (Santesteban, 2004), acondicionamiento turístico de cavidades o la creación de parques geológico-mineros (Orche, 2004), entre otros muchos ejemplos. Incluso también han surgido empresas dedicadas exclusivamente a organizar actividades geoturísticas, tanto para profesionales como para un público no especializado en geología.

Por otro lado, el interés del patrimonio geológico y la geodiversidad a menudo supera el ámbito geológico y se aproxima a otros aspectos científicos, ecológicos y/o culturales. En muchas ocasiones, el patrimonio geológico guarda una estrecha relación con el patrimonio histórico-artístico, con las tradiciones, creencias y folclore de algunos lugares, e incluso puede tener una importante significación religiosa o convertirse en signo de identidad local. Existen infinidad de ejemplos de elementos geológicos que poseen un elevado valor natural que es complementado y aumentado por su interés cultural, que le añade un valor más que puede incluso superar al propio interés geológico.

Además, el patrimonio geológico constituye un importante recurso didáctico. Conscientes de que sólo se aprecia y valora lo que se comprende, la divulgación es un objetivo primordial de la gestión del patrimonio geológico, y uno de los campos en los que más se debe trabajar.

Herramientas para elaborar los estudios de patrimonio geológico

El estudio de este patrimonio es complejo porque en él se conjugan aspectos científicos, técnicos, culturales, económicos, estratégicos, recreativos y sociales. Incluso éticos y filosóficos, ya que lo relacionado con la conservación de la naturaleza posee un profundo trasfondo ético y un desarrollo filosófico importante cuyo conocimiento se hace fundamental para entender su significado.

Actualmente, el estudio del patrimonio geológico busca identificar, evaluar, conservar y divulgar aquellos lugares que posean un elevado valor en relación con las ciencias de la Tierra. Estos cuatro objetivos deben, además, realizarse en ese orden si se quiere conseguir que la gestión sea adecuada. Las herramientas para la realización de estudios de patrimonio geológico son múltiples, pero la realización de inventarios es la más utilizada. Existen numerosos tipos de inventario, dependiendo de los objetivos del estudio y de las características propias del territorio a inventariar.

Las metodologías utilizadas actualmente en España para la realización de inventarios tienen su origen a finales de los años setenta, cuando investigadores ligados al IGME desarrollaron diferentes metodologías para la realización de inventarios, que con posterioridad aplicaron a varios lugares (p. ej. Elizaga et al., 1980; Duque et al., 1983; Elizaga, 1988). Años más tarde, una monografía reunió las aportaciones metodológicas realizadas por un amplio equipo de investigadores (MOPTMA, 1996), en una obra considerada de referencia tanto en España como en Latinoamérica. Más recientemente, varias tesis doctorales se han centrado en aspectos relacionados con el patrimonio geológico, paleontológico y la geodiversidad (Romero, 2004; Bruschi, 2007; Carcavilla, 2007). Una síntesis de la evolución del estudio del patrimonio geológico en España en los últimos 30 años aparece en Durán et al. (2005).

Generalmente, los inventarios consisten en un listado de puntos de interés. Pero un inventario debe ser más que un simple listado, proporcionando información que pueda ser analizada posteriormente y que permita realizar un diagnóstico e incluso definir propuestas de gestión concretas. Esta información debe referirse a la localización y distribución territorial de los puntos seleccionados, su grado de interés, vulnerabilidad y estado de conservación. Fundamentalmente, éstos son los aspectos a los que se debe atender para proponer medidas concretas de conservación, gestión e incluso ordenación territorial, tal y como se ha realizado en algunas ocasiones para la propuesta de protección de grandes zonas naturales (López Martínez, et al., 2003).

Uno de los aspectos más problemáticos es establecer el valor de los puntos de interés. Existen diferentes propuestas al respecto (Cendrero, 1996; López Martínez, et al., 2003;

Alcalá, 1998; Villalobos, et al., 2004; García-Cortés et al. (2000); Carcavilla, 2007) y si bien cada una aporta sus propios matices, prácticamente todas coinciden en diferenciar en la valoración tres parámetros: el valor intrínseco, la potencialidad de uso y el riesgo de degradación. El análisis independiente de cada uno de estos aspectos permite establecer jerarquías entre los puntos en función de su interés geológico, establecer medidas que permitan su divulgación, aprovechamiento y disfrute (por el cual el patrimonio se convierte en un recurso) y estimar cuál es el riesgo potencial o real de degradación y cuáles son las principales amenazas para su conservación. En relación con esto último, la tendencia actual es analizar de manera independiente la vulnerabilidad intrínseca del elemento en cuestión estableciendo escalas de vulnerabilidad y, por otro lado, estimar la influencia de factores externos (p. ej. existencia de carreteras o de señalización de acceso al lugar), que pueden cambiar con el paso del tiempo. El análisis de cada uno de estos aspectos (valor intrínseco, potencialidad de uso y riesgo de degradación) podrá realizarse de manera cualitativa, cuantitativa o mixta, y deberá atender a los objetivos y planteamiento del estudio.

Un problema metodológico frecuente a la hora de realizar inventarios es que, a menudo, los promotores de los mismos son las administraciones locales o autonómicas. Esto provoca que la delimitación de la zona de estudio responda a criterios político-administrativos y no a unidades naturales o geológicas, ya que, como es lógico, las entidades públicas se ciñen al territorio en el que tienen competencias. Esto provoca algunos problemas metodológicos, que si bien no son insalvables, deben ser subsanados para evitar problemas de falta de representatividad.

Si hoy se tienen herramientas más o menos contrastadas y aceptadas para el estudio del patrimonio geológico, no ocurre lo mismo para el estudio y el análisis de la geodiversidad. Recientes publicaciones han abordado el concepto teórico de la geodiversidad (Gray, 2004 y Nieto, 2000), pero aún falta por definir un método que permita concretar cómo se define la geodiversidad de un lugar para poder comparar diferentes territorios. Por el momento, la propuesta más completa al respecto centra su atención en el análisis de la abundancia, frecuencia y distribución de algunos parámetros geológicos, con objeto de definir unos patrones de distribución territorial que sirvan de modelo (Carcavilla, 2007; 2008).

Algunas comunidades autónomas han promovido la realización de inventarios de patrimonio geológico, algunos de los cuales han sido realizados con gran exhaustividad. Cabe destacar los inventarios autonómicos promovidos por el Gobierno balear (Durán, 2006), catalán (Druguet et al., 2003), y por la Junta de Andalucía (Villalobos et al., 2004), constituyendo iniciativas que han sido (y deberían ser) seguidas por otras comunidades autónomas. En el caso de Andalucía se ha dado un importante paso más con el diseño

de una Estrategia Andaluza de Conservación de la Geodiversidad, que sirve de marco para la realización de diversas iniciativas relacionadas con la identificación, valoración, aprovechamiento, divulgación y conservación del patrimonio geológico y la geodiversidad andaluzas (Braga, 2002). Este enfoque, consistente en incluir las iniciativas referidas al patrimonio geológico en una estrategia amplia que permita aprovechar los recursos y las sinergias procedentes de otros ámbitos e iniciativas institucionales, marca la línea que en el futuro debería llevar la gestión del patrimonio geológico y la geodiversidad.

Por otro lado, teniendo en cuenta que el patrimonio geológico linda con otros tipos de patrimonio —paleontológico (biólogos), arqueológico y paleoantropológico (arqueólogos, médicos), minero y mineralúrgico (ingenieros de minas), arqueoindustrial (historiadores)—, la relación con otro tipo de profesionales es muy frecuente. También existe una cierta relación con naturalistas de todo tipo —periodistas (divulgación), urbanistas, ingenieros (planes de urbanismo), arquitectos, ingenieros de montes, agrónomos (conservación, planes forestales, planes de ordenación de recursos)— y, como ya se ha indicado anteriormente, geógrafos y biólogos (espacios naturales protegidos, humedales).

Por último, es preciso citar que existen varias sociedades científicas que trabajan activamente en la difusión y conservación de los lugares de interés geológico. Entre ellas, destaca la labor que han venido desarrollando la Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España con más de 100 socios, la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPEGYM) con más de 400 socios y la Sociedad Española de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio (SEGAOT). Estas sociedades organizan periódicamente reuniones nacionales, fruto de las cuales surgen publicaciones que agrupan las ponencias, conferencias y excursiones de la reunión (Palacio, 2000; Rábano, 2000; y Guillén Mondéjar y Del Ramo, 2004).

El papel del patrimonio geológico en la divulgación de la geología

Muchos de los problemas que actualmente afectan a la profesión de geólogo se deben al gran desconocimiento por parte de la sociedad de la dimensión que los aspectos geológicos tienen en su vida cotidiana. Este desconocimiento se extiende a no asumir las ventajas y mejoras que la geología puede aportar y ha aportado a la sociedad, subestimando el papel del geólogo. A menudo, los medios de comunicación sólo hacen eco de noticias geológicas cuando éstas van unidas a desastres naturales (terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos, riadas o tsunamis, por ejemplo) o civiles (como hundimientos del terreno con colapso de edificios o carreteras). El desconocimiento acerca de la geología afecta además a diferentes estatus sociales, incluyendo el

sector privado, las administraciones, los políticos y, en general, al ciudadano de a pie, lo que se traduce en una escasa presión y demanda por parte de la sociedad hacia los dirigentes políticos y hacia la administración pública.

Independientemente de las causas que han llevado a esta situación de desconocimiento por parte de la sociedad, es evidente que por motivos conceptuales y por el bien de la propia profesión, la divulgación y difusión es una de las grandes tareas pendientes de la geología a día de hoy. En este contexto adquiere especial protagonismo la difusión hacia la sociedad de la realidad geológica a través de la divulgación y puesta en valor del patrimonio geológico mueble e inmueble. El reconocimiento del valor del patrimonio geológico por parte de la sociedad permitiría que la geología adquiriera un mayor protagonismo y viera reconocido su papel, algo que no ocurre a día de hoy. De este hecho se hacía eco la llamada Declaración de Girona, manifiesto redactado en la Reunión Nacional de Patrimonio Geológico celebrado en Girona en 1997, en la que ese afirmaba que "es necesario que los responsables de las diferentes administraciones públicas y centros de investigación, técnicos, científicos, investigadores, ambientalistas, naturalistas, ecologistas, periodistas y educadores se movilicen activamente en una campaña de sensibilización del conjunto de la población a fin de lograr que el patrimonio geológico, indudable cencienta del patrimonio, deje de serlo, en beneficio de todos" (Durán et al., 1998a).

De esta manera, parece claro que el patrimonio geológico puede jugar un importante papel en el acercamiento de la geología a la sociedad. Ya sea porque está constituido por elementos geológicos excepcionales, singulares o representativos y porque éstos poseen un determinado potencial didáctico, los elementos constituyentes del patrimonio geológico pueden y deben ser utilizados para acercar la geología a la sociedad. Por ello, en la gestión del patrimonio geológico y de la geodiversidad debe incluirse la divulgación como método para extender la concienciación general a la sociedad. Por otro lado, se pueden aprovechar los avances y técnicas utilizados en la difusión del patrimonio geológico para la divulgación de determinados aspectos de la geología como ciencia y como profesión.

Pero esta divulgación no debe improvisarse. Debe partir como resultado de una planificación previa. Además, hay que asumir que la puesta en conocimiento de la existencia de elementos geológicos de interés puede provocar una importante degradación de los mismos, sobre todo si de ellos puede extraerse un beneficio económico directo o si pueden ser expoliados. Existen numerosos casos en España en los que la divulgación (generalmente en medios periodísticos) de ciertos afloramientos ha provocado su degradación e incluso su desaparición. Por lo tanto, la divulgación debe ser un proceso diseñado dentro de un plan global de gestión, adaptado a las características del lugar y a su fragilidad.



La divulgación requiere personal cualificado que conozca las técnicas básicas de una comunicación eficaz y atractiva en función del público al que se oriente. Cada vez más la divulgación de la geología supone una salida profesional que requiere geólogos especialistas en comunicación que sean capaces de desarrollar diferentes tipos de materiales divulgativos orientados tanto a fines formativos formales (didáctica, enseñanza), como a fines puramente lúdicos.

Oportunidades profesionales del patrimonio geológico y la geodiversidad

En primer lugar, se va a discutir sobre los tipos de profesionales con los que se relacionan los estudios de patrimonio geológico. Poco a poco la geoconservación va ganando protagonismo dentro y fuera de la profesión geológica. Las entidades conservacionistas y ecologistas no han prestado demasiado interés por la conservación del medio geológico hasta fechas muy recientes, pudiéndose observar una cada vez



mayor conciencia hacia la geoconservación. Un hecho que refleja esta situación es la aprobación en 2007 de tres leyes fundamentales para la gestión del patrimonio geológico y la geodiversidad: la Ley de Parques Nacionales (Ley 5/2007), de Desarrollo Rural (45/2007) y de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (Ley 42/2007). En ellas, y tras un gran esfuerzo de la comunidad geológica española, se ha conseguido incluir aspectos básicos del patrimonio geológico y la geodiversidad.

La puesta en vigor de estas tres leyes abre de manera formal un nuevo campo para la participación de la geología. Y es que si bien algunos de los aspectos desarrollados en estas tres leyes estaban implícitos en las normas legales que han derogado, ahora la conservación del patrimonio geológico y la geodiversidad constituye una obligación por parte de las administraciones públicas. Esto significa que deben apoyarse y promoverse estudios dedicados a definir, conservar y utilizar el patrimonio geológico. De manera que es previsible que en los próximos años las administraciones públicas promuevan este tipo de trabajos, fundamentalmente inventarios y estudios para la declaración de nuevas áreas protegidas, para lo cual es necesario contar con personal cualificado.

Para formar personal en esta temática algunas universidades han incorporado materias en sus planes de estudios (p. ej. universidades Autónoma y Complutense de Madrid, Alicante, el curso de verano que organiza la Universidad Internacional del Mar en Murcia o el Máster de Espacios Protegidos organizado por la Fundación González Bernáldez y que incorpora aspectos directamente relacionados con el patrimonio geológico).

A día de hoy, los principales clientes o impulsores de los estudios de patrimonio geológico son las administraciones públicas (diversos ministerios, IGME, comunidades autónomas, diputaciones, ayuntamientos), aunque, en los últimos tiempos, empresas

públicas y privadas han realizado estudios y publicaciones de gran interés, como ENRE-SA (Durán y Nuche, 2000; Nuche, 2001; 2002; 2003 y 2004) ACUSUR, o FCC.

De manera más reciente, también se están desarrollando iniciativas por parte de inversores privados, sobre todo en relación con el geoturismo. Este tipo de iniciativas que utilizan la geología como reclamo recreativo y lúdico van en aumento en nuestro país. Actualmente se dispone de casi 600 iniciativas geoturísticas de muy diverso tipo (cuevas habilitadas, museos, centros de interpretación, rutas equipadas, etc.) que cada día van en aumento y que permiten, además, ofrecer nuevas oportunidades para el desarrollo en el ámbito rural.

El panorama internacional

También existen iniciativas internacionales para la conservación y puesta en valor del patrimonio geológico y de la geodiversidad. De hecho, la dimensión internacional en el estudio y conservación del patrimonio geológico es fundamental, ya que sirve de garantía para el establecimiento de medidas comunes y para aprovechar las experiencias aplicadas en otros países y que hayan funcionado con éxito. En el panorama internacional, es ProGEO la sociedad científica que auspicia y promueve la conservación del patrimonio geológico. Creada para el ámbito europeo, ha traspasado sus fronteras y se ha convertido en el foro internacional para la discusión de aspectos relacionados con el patrimonio geológico a nivel mundial. ProGEO funciona mediante el establecimiento de grupos de trabajo y de comités nacionales, ya que, aunque, al fin y al cabo, la unidad de trabajo para la realización de inventarios y establecimiento de figuras de protección sea estatal, la responsabilidad de la conservación del patrimonio geológico es internacional.

De cara a la conservación, la existencia de directivas, resoluciones y recomendaciones internacionales referidas a la conservación del patrimonio geológico es fundamental. A menudo, la ausencia de este tipo de documentos dificulta la verdadera implantación de programas de conservación a nivel nacional. Por ello, y tal y como se verá más adelante, adquiere especial relevancia que en el futuro se trabaje en esta línea.

Quizá el proyecto internacional de mayor relevancia para el estudio del patrimonio geológico sea el llamado Global Geosites, iniciado en 1995-1996 por la IUGS (International Union of Geological Sciences). Se trata de un programa cuyo objetivo es realizar un inventario de puntos de interés geológico global, que sirva de soporte al proporcionar una base objetiva para cualquier iniciativa de ámbito nacional o internacional para la protección del patrimonio geológico. Este proyecto sirve de referencia al basarse en un desarrollo metodológico consensuado entre los diferentes países que forman parte del proyecto. El proyecto Global Geosites nació como resultado del debate acerca de las

posibilidades de incluir lugares de interés geológico en esquemas globales de protección y en los listados de patrimonio mundial. En las reuniones de diversos grupos de trabajo de la UNESCO, ProGEO y IUGS (reuniones de Digne, Roma y las reuniones específicas de Geosites), se discutió acerca de cómo realizar inventarios interrelacionados a escala global y nacional. El resultado fue que, en 1995, la IUGS, con el posterior apoyo de UNESCO, puso en marcha el proyecto "Global Geosites", un ambicioso proyecto orientado a elaborar un listado mundial de puntos de interés geológico (Wimbledon, 1997). Aplicando criterios científicos rigurosos, se busca que este inventario global sirva de base para estudiar e interpretar la historia geológica del planeta y para divulgar en la sociedad la importancia de la geología, creando una red de lugares sobresalientes, tanto puntuales como zonas más amplias denominadas genéricamente frameworks o contextos representativos de la geodiversidad mundial. La responsabilidad de identificar los lugares españoles susceptibles de ser integrados en este proyecto recayó sobre el IGME quien, en el año 2000, hizo la propuesta de grandes contextos geológicos (García Cortés et al., 2000) Los resultados de este proyecto de investigación se desarrollan en una publicación monográfica al respecto (García-Cortés, 2008).

El otro gran programa internacional relacionado con el patrimonio geológico es el referido a la creación de geoparques. Un geoparque es un territorio que presenta un patrimonio geológico notable y que desarrolla un proyecto de desarrollo basado en su promoción turística, de manera que debe tener unos objetivos económicos y de desarrollo claros. Se basa en cuatro principios: territorio, patrimonio geológico, motor de desarrollo local (geoturismo) e inclusión en una red temática con objetivos comunes. Aúna, por tanto, aspectos relacionados con la geoconservación y con la promoción del desarrollo sostenible. Nacidos originalmente para el ámbito europeo con idea de crear un diploma o marca registrada de la Unión Europea, en el año 2000 se redactó la Declaración Fundacional de los Geoparques en la isla griega de Lesbos. Pero en el año 2005, en la llamada declaración de Madoine, la UNESCO auspició el programa, extendiendo el ámbito de actuación a todo el mundo y creándolo como complemento al programa de patrimonio mundial. En la actualidad, hay casi 30 geoparques europeos y otros ocho en China, y se prevé que se declaren aproximadamente 20 geoparques al año, hasta alcanzar los 500 en el año 2050. En España existen en la actualidad cuatro geoparques (Sobrarbe, Maestrazgo, Sierras Subbéticas y Cabo de Gata), a los que en breve se sumarán algunos otros que están tramitando actualmente su declaración.

Retos para el futuro

De cara al futuro, varios parecen los grandes retos del estudio del patrimonio geológico. Por un lado, el desarrollo de inventarios para que todas las comunidades autónomas cuenten con un catálogo detallado que sirva para identificar, localizar y valorar su patrimonio

geológico, así como para realizar una síntesis nacional que permita realizar un diagnóstico a nivel del Estado. La aplicación de nuevas técnicas de geoconservación y el avance de nuevos sistemas de protección y desarrollo normativo es otra demanda para el futuro inmediato, con evidentes consecuencias en la protección de los elementos geológicos singulares, algo imprescindible por motivos conceptuales y prácticos. También adquiere especial relevancia el diseño e implantación de sistemas de gestión del patrimonio geológico, en especial si están incluidos en estrategias o planes generales que permitan integrar y relacionar todos los aspectos relacionados con la gestión del patrimonio geológico, con objeto, además, de que se vea plasmado en directivas de carácter nacional e internacional. Desde el punto de vista socioeconómico, es una demanda cada vez más solicitada la aplicación de nuevos sistemas de aprovechamiento del patrimonio geológico como recurso, que sirva como acicate y motor para el desarrollo local. Y, por último, el reconocimiento por parte de la sociedad y de las administraciones responsables, del papel del patrimonio geológico como parte importante del patrimonio natural y como elemento presente en la vida cotidiana, con relación directa en la calidad de vida de la sociedad.

Para ello, parece claro que es necesaria la existencia de geólogos especializados en patrimonio geológico, cuya formación proceda de universidades (a través de cursos de postgrado y programas de tercer ciclo), másteres y cursos de especialización impartidos incluso por instituciones, universidad y los propios colegios profesionales.

Conclusiones

El estudio, gestión y divulgación del patrimonio geológico y la geodiversidad constituyen campos nuevos de especialización para los geólogos, con una dimensión nacional e internacional. Tienen una enorme proyección que, además, es previsible y deseable que vaya en aumento en el futuro, tanto en lo referente al patrimonio geológico como en el de la geodiversidad y la geoconservación; también en lo referente a la divulgación y la utilización didáctica y turística de los recursos geológicos, y más en un país como España, donde la diversidad geológica es muy elevada, las condiciones climáticas muy favorables y la estructura económica cada vez da más prioridad al sector servicios. Pero este emergente campo profesional requiere profesionales preparados que desarrollen su labor en empresas y en la Administración, lo que a su vez requiere un esfuerzo formativo por parte de las universidades y del propio Colegio de Geólogos. Y, más aun, en la actualidad, cuando ya están en vigor las nuevas leyes nacionales de Desarrollo Rural, Parques Nacionales y Patrimonio Natural —a las que sumar la nueva Ley de Patrimonio histórico-artístico, actualmente en redacción—, que definirán el papel que el patrimonio geológico jugará en el futuro más inmediato.

Referencias bibliográficas

Alcalá, L. (1998). Evaluación patrimonial de los yacimientos de vertebrados miocenos de Conclud (Teruel). Durán J. J. y Vallejo, M. (eds.). Comunicaciones de la IV Reunión de la Comisión de Patrimonio Geológico. Sociedad Geológica de España, Madrid, 29-32.

Arrese, B.; López-Martínez, J.; Durán, J. J.; Carcavilla, L.; Berrio, M. P. y Vallejo, M. (2004). Patrimonio geológico y geodiversidad en el ámbito municipal: el caso de Galapagar (Comunidad de Madrid). Mata-Perelló, J. M. y Gavaldá, J. (eds.) Actas de la VI Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico. Salardú (Lleida), 93-101.

Braga, J. C. (coord.) (2002). Propuesta de estrategia andaluza para la conservación de la geodiversidad. www.juntadeandalucia.es/medioambiente/planesmed.

Bruschi, M. V. (2007). Desarrollo de una metodología para la caracterización, evaluación y gestión de los recursos de la geodiversidad. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.

Carcavilla, L.; López-Martínez, J. y Durán, J. J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Carcavilla, L.; López Martínez, J. y Durán, J. (2008c). Different approaches for the study of geodiversity. Abstracts of the 33th International Geological Congress.

Cendrero, A. (1996). El patrimonio geológico. Ideas para su protección, conservación y utilización. MOPTMA. El Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 17-38.

Druguet, E.; Carreras, J. y Herrero, N. (2004). Inventario de espacios de interés geológico de Cataluña. 1. Antecedentes y metodología. Mata-Perelló, J. M. y Gavaldá, J. (eds.). Actas de la VI Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico. Salardú (Lérida), 17-26.

Duque, L. C.; Elízaga, E. y Vidal Romanía, J. R. (1983). Puntos de Interés Geológico de Galicia. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Durán, J. J. (coord.) (2006). Islas de agua: Patrimonio Geológico e Hidrogeológico de las Islas Baleares. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Durán, J. J. y Nuche R. (1999). Patrimonio geológico de Andalucía. Enresa, Madrid.

Durán, J. J., Carcavilla, L. y López-Martínez, J. (2005). Patrimonio geológico: una panorámica de los últimos 30 años en España. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica) 100(1-4): 277-287.

Durán, J. J.; Brusi, D.; Palli, Ll.; López-Martínez, J.; Palacio, J. y Vallejo, M. (1998). Geología Ecológica, Geodiversidad, Geoconservación y Patrimonio Geológico: La Declaración de Girona. Comunicaciones de la IV Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico, Sociedad Geológica de España, Madrid, 69-72.

Elizaga, E. (1988). Georrecursos culturales. Geología Ambiental, 85-100. ITGE, Madrid.

Elizaga, E.; Abril, J.; Duque, L. C.; García Salinas, F. y Murcia, V. (1980). Los puntos geológico-mineros de interés singular como patrimonio natural. Su inventario y metodología de estudio. I Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Volumen de Comunicaciones, 21. Santander.

García-Cortés, A.; Baretino, D. y Gallego, E. (2000). Inventario y catalogación del patrimonio geológico español. Revisión crítica y propuestas de futuro. Baretino, D., Wimbledon, W.A.P.; Gallego, E. (ed.) Geological heritage: its conservation and management. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 51-71.

García Cortés, A.; Rábano, I.; Locutura, J.; Bellido, F.; Fernández Gianotti, J.; Martín Serrano, A.; Quesada, C.; Barnolas, A. y Durán, J. J. (2000). Contextos geológicos españoles de relevancia internacional: establecimiento, descripción y justificación según la metodología del proyecto Global Geosites de la IUGS. Boletín Geológico y Minero 111(6): 3-30.

Gray, M. (2004). Geodiversity. Valuing and conserving abiotic nature. John Wiley & Sons, West Sussex.

Guillén Mondéjar, F. y Del Ramo, A. (eds.) (2004). El Patrimonio Geológico: Cultura, Turismo y Medio Ambiente. Universidad de Murcia.

ITGE (1992). El Patrimonio Geológico.

López-Martínez, J.; Durán, J. J.; Carcavilla, L. y Arrese, B. (2003). Estudio de Geología y Geomorfología de la Sierra de Ayllón. Universidad Autónoma de Madrid, Tragsatec y Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, 27 mapas (inédito).

Martini, G. (2000). Patrimonio geológico y geoturismo. Baretino, D., Wimbledon, W. A. P. y Gallego, E. (eds.). Patrimonio Geológico: conservación y gestión. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 161-170.

MOPTMA (1996). El Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.

Nieto, L. M. (2001). Geodiversidad: propuesta de una definición integradora. Boletín Geológico y Minero 112(2): 3-11.

Nuche, R. (ed.) (2000). Patrimonio geológico de Cataluña. ENRESA, Madrid.

Nuche, R. (ed.) (2001). Patrimonio geológico de Castilla-León. ENRESA, Madrid.

Nuche, R. (ed.) (2002). Patrimonio geológico de Asturias, Cantabria y País Vasco. ENRESA. Madrid.

Nuche, R. (ed.) (2003). Patrimonio geológico de Castilla-La Mancha. ENRESA, Madrid.

Nuche, R. (ed.) (2004). Patrimonio geológico de Galicia. ENRESA, Madrid.

Orche, E. (2004). La función multidisciplinar de los parques geomineros. Guillén Mondéjar, F. y Del Ramo, A. (eds.). El Patrimonio Geológico: Cultura, Turismo y Medio Ambiente. Universidad de Murcia, 93-100.

Palacio, J. (coord.) (2000). Jornadas sobre Patrimonio Geológico y Desarrollo Sostenible. Serie Monografías. Ministerio de Medio Ambiente. Sociedad Española de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Madrid.

Rábano, I. (ed.) (2000). Patrimonio geológico y minero en el marco del desarrollo sostenible. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero-IGME, Madrid.

Romero, G. (2004). El patrimonio paleontológico de la región de Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

Santiesteban, C. (2004). El Parque Geológico de Chera (Valencia) como modelo de protección del patrimonio geológico para la promoción del desarrollo rural y turístico.

Villalobos, M.; Braga, J. C.; Guirado, J. y Pérez Muñoz, A. B. (2004). El inventario andaluz de georrecursos culturales: criterios de valoración. *De Re Metallica* 3: 9-21.

Wimbledon, W.A.P. (1997). Geosites, a new conservation initiative. *Episodes* 19: 87-88.

El geólogo geomorfológico

Juan Ramón Vidal Romani

Catedrático del Área de Geodinámica de la Universidad de A Coruña

Director del Instituto Universitario de Geología "Isidro Parga Pondal"

Para qué sirve la geomorfología

La Geomorfología es una disciplina más de las impartidas en la licenciatura de Geología. Si en los primeros momentos de desarrollo de la geología la geomorfología se podía considerar como complementaria al resto de la ciencia geológica, en los últimos años, desde el comienzo de la exploración geológica espacial de la propia Tierra, primero, a través de la red de satélites y, luego, del estudio de otros planetas o asteroides del sistema solar, su personalidad propia y su importancia se ha ido incrementando progresivamente. Su utilidad más relevante en los trabajos geológicos es la de permitir obtener información sobre los procesos geológicos a partir del estudio de la morfología superficial del terreno.

Una consecuencia de la dinámica terrestre endógena o exógena es la generación de rocas y sedimentos que en algunos casos lleva asociada también una morfología exterior o subaérea específica. Las formas que apreciamos en la superficie del terreno son habitualmente el resultado de acumulación de materiales geológicos (rocas y sedimentos). Por ejemplo, una acumulación de lavas o piroclastos o los depósitos acumulados por los glaciares o por el viento asocian claramente formas con procesos geológicos (figura 1). En todos los casos, la morfología final que resulta de estos procesos acumulativos es fácilmente identificable por una persona experta aunque en ocasiones su identificación correcta pueda plantear problemas. Es el caso de un campo de bloques formado por la desintegración de un macizo granítico que se puede confundir con facilidad con una superficie recubierta por morrenas supraglaciares. En otros casos, las



Figura 1. Campo de dunas superponiéndose a un cauce fluvial en Marte como un ejemplo de cronología relativa de procesos muy separados en el tiempo. Las dunas son subactuales mientras que los cauces fluviales se han formado cuando existía agua líquida en Marte hace miles de millones de años (foto: cortesía de NASA).

formas pueden haber sido producidas por la erosión al actuar sobre rocas o sobre sedimentos, consolidados o no, debido a la acción de los procesos geológicos (endógenos, exógenos o ambos). En casos como éstos, la identificación de la forma resultante puede ser un poco más problemática ya que la erosión, actuando, por ejemplo, sobre una roca con una fábrica estructural bien marcada (estratificación, diaclasado, fracturación, etc.), puede incorporar parte de esos rasgos, no erosivos, a los propiamente originados por la erosión dando lugar a graves errores interpretativos. Es el caso de los inselberg tipo domo con exfoliación desarrollados en rocas graníticas y que durante mucho tiempo han sido identificados erróneamente como formas exógenas, con todas las consecuencias que eso implica para la interpretación del relieve y su relación con el clima actual o pasado. En zonas más o menos fácilmente accesibles como cualquier escenario de la Tierra, errores de ese tipo serían fácilmente subsanables pero con la exploración espacial en pleno auge es imprescindible afinar al máximo la herramienta geomorfológica a la hora de interpretar la imagen de una superficie que es, a veces, la única información recibida de ambientes muy alejados al nuestro.

En geología, durante mucho tiempo, se ha infravalorado la importancia de los datos que proporciona el estudio de la morfología del terreno como un método adicional para conocer la historia geológica de la Tierra, o para determinar su dinámica externa o interna y poder predecir la evolución de la superficie terrestre a corto plazo (geológicamente hablando). Quizás la justificación principal para esta desconsideración es que en la mayor parte de los casos no era posible datar una forma, en especial cuando se trata de

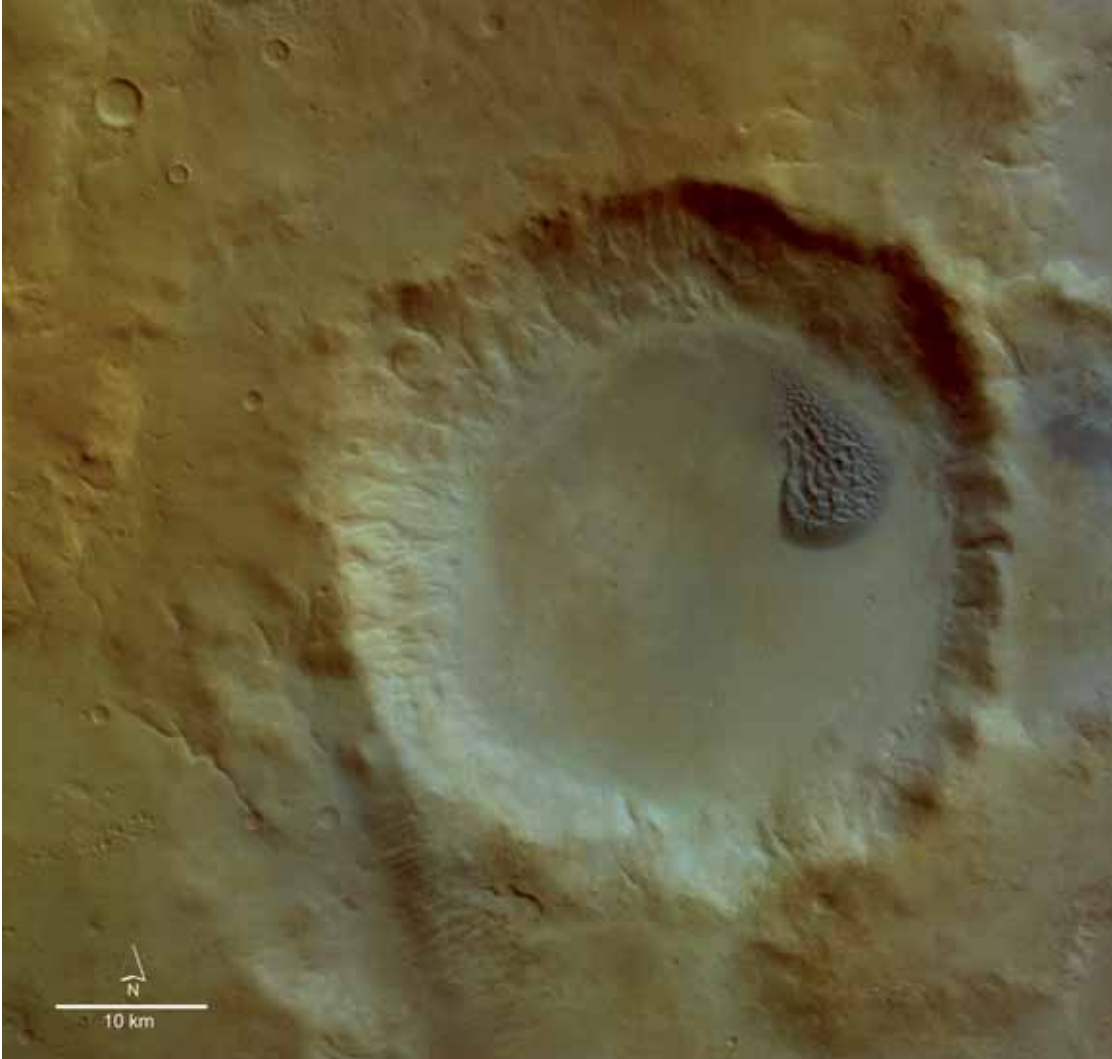


Figura 2. Cráter de impacto meteorítico con desarrollo de un campo de dunas en su interior. Un ejemplo de cronología relativa de dos formas con diferente edad. El grado de deterioro de los bordes del cráter indica una gran antigüedad mientras que el campo de dunas es subactual (foto: cortesía de NASA).

una forma erosiva desarrollada por ejemplo sobre una roca, como un granito, generada en un ambiente endógeno y con una edad que no tiene nada que ver con la de su exposición en superficie. Se parte de la idea de que cualquier geólogo puede interpretar adecuadamente una imagen del terreno, lo que es cada vez menos cierto a medida que aumenta la diversificación del conocimiento geológico debido a la especialización. También ocurre que los medios de estudio de la superficie de la Tierra se hacen cada vez mas complejos (georadar, análisis espectral para determinar la litología y la mineralogía de superficie, así como las nuevas técnicas de datación de superficies) y, en consecuencia, el trabajo geomorfológico es cada vez más preciso. Por otra parte, la suposición de que siempre existe una relación directa clima-morfología, algo que frecuentemente no es correcto, sobre todo para el caso de formas erosivas desarrolladas sobre rocas endógenas, o la imposibilidad de establecer más que una cronología aproximada (relativa) (figura 2) para las formas, ha restado fiabilidad a las interpretaciones geomorfológicas.



Figura 3. Red de drenaje fluvial en Granicus Vallis, Marte. Corresponde a la etapa de agua fluida y circulante sobre la superficie del planeta, hace miles de millones de años (foto: cortesía de NASA).



Figura 4. Túneles de lava colapsados en los flancos del volcán Ascraeus Mons, Marte. Los túneles de lava, como sus congéneres terrestres, se forman por circulación de lavas fluidas después de consolidada la parte superior de una colada de lava. Pueden tener miles de millones de años, cuando la actividad volcánica existía en el planeta (foto: cortesía de NASA).

Habitualmente los paisajes superficiales se han venido considerando como unidades morfológicas con una misma edad (la actual de observación), cuando en realidad es que están formados por elementos morfológicos con muy diversas edades, a veces, muy separadas en el tiempo. Quizás el mejor ejemplo es el que nos da la observación de la superficie de Marte tal como nos la proporcionan en la actualidad las imágenes de satélites, rovers o sensores remotos. El paisaje marciano (figuras 3 y 4) es una mezcla de rasgos morfológicos creados hace miles de millones de años y formados por coladas de lava, depósitos marinos, fluviales y glaciares a los que se superponen otros más recientes como los asociados a los impactos meteoríticos, los deslizamientos de vertientes o

los campos dunares y que son subactuales o, al menos, tienen edades mucho más modernas.

Como se puede ver, la mayor parte de la información obtenida por esta técnica morfológica de trabajo es predominantemente cualitativa y no cuantitativa. La aceptación generalizada por todos los científicos, geólogos o no, de la teoría de la Tectónica de Placas o de Tectónica Global ha transformado totalmente la situación descrita, pues ahora tenemos la certeza de que la mayor parte de la morfología que hoy podemos ver en la superficie terrestre ha sido originada durante los 200 últimos Ma, que es el momento en el que se produce la gran revolución geomorfológica en la superficie terrestre motivada por la fragmentación de Pangea. Esto no entra en contradicción con el hecho de que algunas formas más antiguas hayan sobrevivido a este proceso como tampoco que en todas ellas se hayan podido producir modificaciones de detalle más o menos importantes durante los últimos 200 millones de años. Conviene tener en cuenta que la Tectónica de Placas aún continúa activa en el momento actual lo que implica una sucesión continua de cambios desde entonces que son más evidentes en las zonas emergidas por el efecto de la erosión realizada por las aguas continentales.

Se puede decir que cuanto mayor sea la antigüedad de una forma definida en la superficie de la Tierra mayor es su desconexión, esencialmente expresada por la diferencia de edad de formación, respecto a las que la rodean. Podemos hablar así de formas aisladas (formas heredadas), que siempre han permanecido en superficie desde que se formaron, o de formas exhumadas, que se han conservado temporalmente después de definidas, debajo de una cubierta sedimentaria hasta que los procesos erosivos las han expuesto nuevamente y estas formas relictas, sólo excepcionalmente, constituyen totalmente un paisaje, siendo a lo sumo partes de él.

La razón de la breve historia geomorfológica de la Tierra (apenas 200 Ma contra los 4.500 Ma de edad de la Tierra) salvo excepciones aisladas de formas más antiguas que hayan podido sobrevivir hasta la actualidad se debe a que en nuestro planeta se ha dado la circunstancia de la existencia de agua líquida en su superficie desde los primeros 200 Ma después de su formación y de que los procesos erosivos asociados al ciclo hidrológico normal han destruido o modificado con gran eficacia los relieves previos. Sin embargo, la investigación espacial con la exploración de los llamados planetas o satélites rocosos (Marte, Venus, Luna) donde el agua nunca existió en forma líquida, o si la hubo dejó de formar parte de su superficie hace miles de millones de años (figura 5), ha permitido la conservación prácticamente intacta de paisajes muy antiguos hasta el momento actual. Este hecho permite asignar edades muy antiguas, a veces de hasta 2.000 Ma antes de ahora a la superficie de esos cuerpos del sistema solar incrementando allí, por tanto, las posibilidades de la geomorfología.

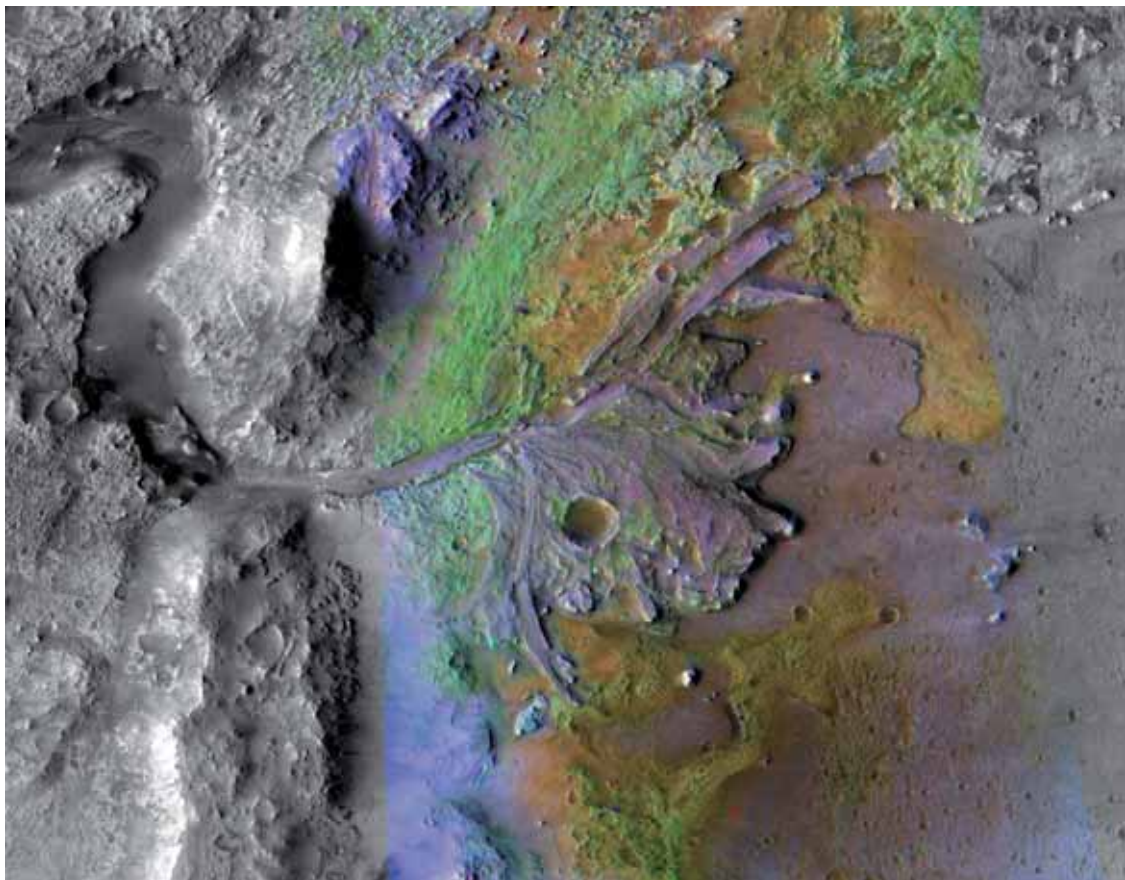


Figura 5. Delta fluvial alojado en el cráter de impacto Jezero en el que llegó a formarse un lago. El antiguo río arrastraba minerales arcillosos con hierro (color verde en la foto) que formaron el delta (imagen cortesía de NASA).

Hasta hace muy pocos años la geomorfología se basaba en la interpretación de las formas del terreno desarrolladas principalmente sobre sedimentos (en este caso el origen del sedimento es la clave de la interpretación de la forma) y, más subordinadamente, sobre el sustrato rocoso cuando la erosión había dejado sobre éste rasgos morfológicos inequívocos como superficies de abrasión glaciaria, eólica, marina, etc. En otros casos, por ejemplo una superficie, es decir, una área rocosa con un relieve predominantemente plano, se ha identificado indefectiblemente como una superficie de erosión. Si esa forma se situaba al borde del mar se identificaba como de origen marino, si en las proximidades de un río era de erosión fluvial y si estaba en un área glaciada se interpretaba como de abrasión o de erosión glaciaria. La geomorfología ha permitido añadir a estos tipos de superficies geomorfológicas una más, que sorprendentemente es la más frecuente y que es la superficie etche o de corrosión química, que se desarrolla en el límite del suelo con el sustrato rocoso por procesos de alteración subedáfica.

La edad de las unidades geomorfológicas

La identificación de una superficie con un proceso geomorfológico —salvo en el caso de que lleve asociado un sedimento— puede dar lugar a errores que se ven incrementados por la dificultad que existía hasta hace muy poco tiempo de obtener la edad de una superficie de erosión (figura 6). Como es bien sabido, una de las claves para la interpretación de los procesos geológicos es contar con un método adecuado de datación de rocas y/o sedimentos, para lo que se dispone de un amplio abanico de métodos cronológicos relativos (poco precisos) o absolutos (esencialmente restos orgánicos fósiles o datos proporcionados por isótopos estables o radioactivos). Sin embargo, en el caso de la geomorfología las dificultades se incrementan, pues lo que se está tratando de datar es una aparente unidad del relieve, el actual, donde aparecen asociadas formas que han sido originadas por procesos a veces muy diferentes que además no tienen por qué haberse desarrollado al mismo tiempo. Se puede dar el caso de que un mismo paisaje se haya formado en momentos muy diferentes separados por intervalos de miles o aun millones de años de diferencia, lo que permite hablar de formas heredadas o aun de paisajes heredados. Por ejemplo, los paisajes glaciados de la Península Ibérica aunque ahora no contienen hielo, han sido evidentemente formados por la acción erosiva o acumulativa de sedimentos, propiciada por los glaciares pleistocenos. Son, por tanto, paisajes heredados de una época separada de la actual en cientos de miles de años o millones de años. Hasta ahora, para diferenciar las distintas unidades geomorfológicas que constituyen un paisaje concreto se aplicaba la misma metodología que la utilizada para los procesos geológicos normales, es decir, utilizando los sedimentos con posibilidades de ser datados asociados a ellos. Cuando un paisaje estaba constituido por formas erosivas, su datación, hasta hace algunos años, suponía un grave problema.



Figura 6. Efecto de la deflexión del viento realizada por relieves tipo Mesa en una superficie marciana. Los residuales se formaron por erosión fluvial hace miles de millones de años mientras que las dunas transversales son subactuales (foto: cortesía de NASA).

Afortunadamente la invención de métodos nuevos de datación como la cronología por cosmogénicos estables y/o radioactivos nos permite datar superficies erosivas, aun las desarrolladas sobre rocas, sin mayor dificultad. Normalmente, cualquier geólogo se considera capacitado para realizar un trabajo geomorfológico sin ningún tipo especial de aprendizaje, lo que no es estrictamente cierto. Tal vez por ello, tradicionalmente, se ha abandonado esta parte de la formación geológica en beneficio de otros profesionales de la ciencia —principalmente de los geógrafos—, a los que se considera preparados para ello, lo que, salvo casos excepcionales, no es cierto. La geomorfología requiere tener una completa formación en geología que raramente posee un licenciado en geografía, y además debe contar con un buen conocimiento del funcionamiento de los procesos exógenos, en especial la erosión y sedimentación. Pero igualmente, por la razón a la que antes se aludía, requiere tener una idea de la dimensión geológica del tiempo para entender mejor el proceso por el que se asocian en un mismo paisaje formas que han sido generadas a lo largo de intervalos de tiempo muy largos, incluso geológicamente hablando.

El trabajo que realiza

Esencialmente, los estudios geomorfológicos suministran dos tipos de información. La que el geólogo geomorfológico obtiene sobre el terreno valorando los procesos que han actuado sobre una área determinada en una época reciente —que puede ser de decenas de miles de años a millones de años, como ocurre en los paisajes estables de la Tierra como en la Antártida, Australia, etc.—, donde se han reconocido formas de varios millones de años de antigüedad. Este hecho es más evidente en otros planetas como Marte, Venus o la Luna donde ha existido una generalizada ausencia de cubierta de agua que explica que allí puedan verse aún paisajes intactos con edades de centenares o incluso miles de millones de años.

Otro tipo de información geomorfológica se suministra mediante mapas geomorfológicos s.s. o mapas de usos del terreno, mapas de riesgos geológicos, cada uno de ellos con una específica aplicación donde mediante una adecuada clave gráfica (leyenda geomorfológica), se representan los datos geomorfológicos observados. Los mapas geomorfológicos s.s. tienen esencialmente un uso científico aunque parte de la información contenida en ellos puede ser aplicada a otros fines más específicos: asentamientos urbanos, diseño de vías de comunicación, etc. Los mapas de usos del terreno permiten fijar a priori la utilidad o riesgos derivados del uso de una superficie determinada. Los usos científicos de la cartografía geomorfológica permiten, además, realizar evaluaciones de patrimonio natural al contribuir a resaltar el valor de los recursos geomorfológicos concretos de una zona determinada y que han sido habitualmente pasados por alto en otras especialidades geológicas. La mayor parte de los recursos morfológicos que se reconocen están relacionados con procesos geomorfológicos bien conocidos como

procesos glaciares, eólicos, fluviales, marinos, de vertiente entre los procesos exógenos y entre los endógenos, tectónicos, volcánicos (éstos incluyen tanto ambientes subaéreos como subterráneos). Igualmente están los recursos geomorfológicos relacionados con la litología, especialmente para el caso de rocas solubles (calizas, yesos, rocas salinas), tanto en ambientes subaéreos como en ambientes subterráneos. Mención especial debe hacerse de los recursos morfológicos asociados a rocas consideradas no solubles como cuarcitas y granitos s.l. En este caso, el progreso reciente ha sido verdaderamente importante al experimentar un notable desarrollo las formas de disolución ligadas a este tipo de rocas y que dan lugar, como sus congéneres en los sistemas cársticos, a la formación generalizada de espeleotemas —en este caso de minerales como evansita, taranakita, alofano, ópalo, pigotita, struvita, etc.— y que presentan características muy similares a las bien conocidas, por ejemplo, para depósitos similares en las cuevas calcáreas. Un mapa geomorfológico bien realizado y adecuadamente interpretado presenta una gran utilidad a la hora de regular la ocupación del terreno para las múltiples actividades humanas. Y la ventaja, que ahora se va extendiendo también a los mapas geológicos, metalogenéticos, tectónicos, etc. es que no requiere estar sobre el terreno a estudiar pues gran parte de los datos se pueden adquirir por los llamados sensores remotos. En este sentido, es digno de resaltar que el IGME incluye en su programa de cartografía geológica para todo el territorio nacional la equivalente cartografía geomorfológica.

El trabajo del geomorfológico se incorpora cada vez con más frecuencia al de los equipos de trabajo, bien de la universidad, administración estatal o autónoma, centros de investigación o empresas en los que debe realizar un reconocimiento previo del terreno sobre el que se vaya a desarrollar una actividad concreta. Este reconocimiento previo se puede realizar en la mayoría de los casos, inicialmente, a partir de imágenes con distintos formatos sobre los que determina la dinámica actual exógena o endógena a partir de la observación de las formas visibles. Aunque es aconsejable, a veces por dificultades diferentes no se puede acceder directamente al área de trabajo, lo que le permitiría completar la información previa. Es el caso del trabajo a realizar en zonas de difícil o aun imposible acceso como son los ambientes exteriores a la Tierra (planetas, satélites, asteroides, etc.). Un buen ejemplo son los casos de las imágenes recibidas por las principales agencias espaciales (NASA, ESA) a veces con resolución de unos pocos metros o en el caso de los rovers espaciales o sondas espaciales de imágenes a escala real. La diferencia de la interpretación de las imágenes de satélites por un observador no especializado y un geomorfológico son enormes. En el primer caso se puede observar un acontecimiento reciente, como por ejemplo el seguimiento de un móvil en tiempo real o determinar la construcción de edificios o movimientos de tierra en plazos de tiempo cortos. Por el contrario, las observaciones realizadas en los estudios geomorfológicos permiten investigar la evolución de una superficie en tiempos geológicos previos al actual a veces cientos de miles de años o aun, como en el caso de cuerpos planetarios sin

presencia de agua, cientos o aun miles de millones de años como en el caso de Marte. Es de este modo como con mucha antelación a la llegada de los ingenios espaciales a la Luna o a Marte, los geomorfólogos habían podido conocer la existencia de glaciares, océanos y mares en Marte, un hecho que ahora se trata de confirmar de forma parcial y puntual con los rover o el Phoenix Mars Lander. Otros supuestos menos exóticos pueden ser los de estudios de paisajes terrestres donde se vaya a realizar alguna actividad con o sin participación humana en un futuro inmediato.

Los conocimientos que aporta

La geomorfología aporta unos conocimientos complementarios a los que proporcionan las demás especialidades de la geología, pues mientras el estudio de sedimentos y rocas o los elementos que las constituyen —granos, minerales y fósiles— se refieren a los aspectos genéticos de rocas y sedimentos, la geomorfología se refiere al resultado de esos procesos de superficie no siempre relacionados con sedimentos y/o rocas. Inicialmente, los datos de superficie pueden dar una idea de la dinámica subreciente aunque a veces dependiendo de las condiciones superficiales (existencia o no de trabajo realizado por el agua), la cronología de los procesos reflejados en la morfología superficial puede ser mucho más antigua (paisaje marciano o de zonas intraplaca en escudos continentales terrestres). En todos esos casos, sobre todo cuando el terreno estudiado es de acceso difícil o peligroso, la geomorfología puede proporcionar información muy valiosa al no existir otro medio de obtenerla (p. ej. no existir registro sedimentario o rocoso que lo permita).

Un análisis geomorfológico de superficie proporciona, pues, información de los procesos que han actuado sobre una superficie con datos a veces muy precisos: dirección del viento, de corrientes de agua, intensidad o magnitud de las mismas, sin necesidad de que exista un contacto directo con las mismas, es decir, a partir de sensores remotos o por el registro de datos a veces a muy gran distancia. Un acceso más próximo a la superficie proporcionará, por supuesto, mayores detalles y más precisos, aunque nuevamente de la dinámica superficial en la zona. A veces, un simple examen de una superficie permite establecer una secuencia relativa de los procesos que han afectado a un dominio determinado. Como por ejemplo la determinación de edades por la densidad de craterización por impactos meteóricos en Marte o la Luna o la evolución de una red de drenaje.

Herramientas que utiliza

Los estudios geomorfológicos, como cualquier trabajo geológico s.s., utilizan además del examen sobre el terreno cualquier imagen del relieve previa al momento actual: desde fotografía aérea, mapas antiguos, dibujos antiguos, además de imágenes suministradas por

sensores remotos y fotografía por satélite tanto de la Tierra como de otros cuerpos del espacio (hasta el momento de nuestro sistema solar). Igualmente es de utilidad el uso de mapas topográficos a escalas grandes (1:5.000; 1:10.000) que, combinados con el estudio del terreno, permiten una cartografía de detalle de la morfología que se describe. En el momento actual, el acceso a cualquier imagen de la superficie de la Tierra a través herramientas como el Google Earth o Google Mars facilita enormemente la realización de cualquier trabajo geomorfológico.

Además del examen y tratamiento de imágenes, sin duda la herramienta decisiva en los trabajos geomorfológicos actuales, son los medios de datación, absolutos o relativos que están a disposición del geomorfólogo moderno.

Métodos de datación absolutos

La datación de episodios erosivos geomorfológicos es virtualmente imposible sin el auxilio de la medida de isótopos cosmogénicos generados por la interacción de la roca con los rayos cósmicos. Esta interferencia origina nuevos (in situ) nucleidos estables o radioactivos que se acumulan en la superficie expuesta y cuya preservación (total o parcial) indefinida depende de la estabilidad (erosiva) de la superficie y del tipo de nucleido generado.

Durante muchos años después de su descubrimiento —en 1912—, por el físico austriaco Victor Hess, los rayos cósmicos fueron estudiados por física de partículas. En 1934, V. Grosse sugirió que la interacción de los rayos cósmicos con la superficie terrestre podría generar nuevos nucleidos que fueron denominados como radioelementos cósmicos. El primer intento de medir los nucleidos cosmogénicos formados in situ se realizó midiendo ^{36}Cl en superficies desarrolladas sobre rocas básicas situadas por delante del máximo avance de la última glaciación pleistocena en las Montañas Rocosas (EE UU). La detección de los nucleidos cosmogénicos estaba condicionada por las limitaciones instrumentales de la época, que de hecho no fueron superadas hasta 1980 cuando el desarrollo de las técnicas de AMS y NG-IRMS amplió sustancialmente el límite de detección adecuándolo a la producción de nucleidos cosmogénicos en la Tierra. Hasta ese momento sólo se habían podido realizar estudios de nucleidos cosmogénicos en meteoritos o en muestras lunares donde las tasas de producción eran 102 a 103 veces mayores que en las muestras terrestres, debido también a las bajas tasas de erosión.

Hasta ahora, esta técnica que utiliza distintos nucleidos ha sido aplicada a superficies con un origen geomorfológico muy diferente, si bien los mejores resultados registrados hasta el momento corresponden a bloques morrénicos y superficies pleistocenas de erosión glaciar. Otras superficies datadas corresponden a episodios volcánicos efusivos, episodios paleosísmicos, superficies asociadas a zonas de encajamiento o levantamiento y también

impactos meteoríticos, es decir, fenómenos geológicos con un desarrollo rápido. Por otra parte, las tasas de erosión deducidas por los nucleidos cosmogénicos permiten un estudio cuantitativo de procesos a diferentes escalas temporales en la evolución del paisaje, desde la formación de los suelos hasta la generación del regolito.

La producción de nucleidos cosmogénicos depende de la localización topográfica de la superficie expuesta (las mejores localizaciones corresponden a zonas elevadas sin relieves dominantes que las circunden), de la mineralogía del sustrato y del tiempo de exposición. El cuarzo es el mineral ideal para las medidas de nucleidos cosmogénicos debido a su estructura cristalina y a su abundancia en la superficie de la litosfera. Existen varios nucleidos que se generan en el cuarzo por la radiación cósmica: isótopos radioactivos como ^{10}Be , ^{14}C o ^{26}Al se miden por AMS y la edad la determina la correspondiente constante de desintegración radioactiva y la tasa de erosión que reduce la concentración del isótopo en la superficie rocosa; los isótopos estables como el ^3He o el ^{21}Ne se miden por Espectrometría de Gases Nobles (NGMS) y su acumulación es teóricamente ilimitada y sólo está limitada por la erosión.

Obviamente, cada isótopo tiene sus propios problemas metodológicos y no todos los isótopos sirven para datar el mismo proceso geológico. Un problema común a todos ellos es el de dilucidar con precisión los nucleidos acumulados en una superficie rocosa determinada debido a la radiación cósmica y los que lo han sido (componentes atrapados) por otros procesos. Dependiendo del isótopo estudiado los nucleidos producen partículas alfa por la desintegración de los elementos radiactivos contenidos en la roca o por la suma de procesos previos (por ejemplo, una superficie que ha sido exhumada y enterrada varias veces) lo que puede sumarse a la concentración total medida. La preparación de la muestra con carácter previo a la medida debe minimizar lo posible estos efectos, que se pueden corregir aplicando modelos empíricos y teóricos además de ir acompañados de un correcto conocimiento de la historia geomorfológica de la superficie analizada. La obtención de una edad de exposición para una superficie requiere el conocimiento de la tasa de producción del isótopo concreto en el material analizado y, a su vez, la estimación empírica de la edad de una superficie requiere la calibración de la concentración obtenida con una edad de exposición, estimada por otros medios como la fosilización de la superficie datada por depósitos de cronología bien conocida o la determinación de la edad por diferentes nucleidos cosmogénicos.

Preparación y toma de muestras

Las muestras donde se vaya a aplicar esta técnica de datación se obtienen por extracción de testigos cilíndricos con una perforadora; los cinco centímetros superiores se trituran para obtener diferentes fracciones granulométricas. La selección se realiza después

con una inspección a la lupa binocular, sobre la fracción entre 0,5 a 0,95 milímetros, procurando que en ella exista la mayor pureza de cuarzo que es la que se separará para la determinación del ^{21}Ne . La preparación de la muestra comienza con un ataque químico para purificar la muestra de cuarzo, con el objeto de eliminar la parte más externa del grano de cuarzo y con ello la zona de penetración de las partículas alfa nucleogénicas. Una inspección final de los granos seleccionados después del ataque químico sirve para eliminar aquellos que son de feldespato o que presentan inclusiones feldespáticas. Una vez seleccionada la muestra se introduce en un horno, donde se procede a la extracción del gas de forma secuenciada a temperaturas entre 300 °C y 1.200 °C llevando la muestra hasta la fusión a 1.600 °C. El tiempo de extracción está entre 20 y 30 minutos hasta 800 °C, y 20 minutos para el tramo final de mayor temperatura.

El Martillo de Schmidt

Existen diferentes métodos para la caracterización física superficial del grado de alteración de las superficies rocosas pero el más conocido es el denominado Martillo de Schmidt. Se puede considerar como una técnica de datación (relativa), complementaria al método de los nucleidos cosmogénicos. La medición de la dureza superficial consiste esencialmente en el impacto estándar en la superficie de una masa específica (Martillo de Schmidt) activada por una cantidad de energía definida, midiéndose la magnitud de rebote (R-valores). Aunque es difícil justificar la relación teórica entre el valor medido por este método y la solidez de la superficie, la aplicabilidad reside en la capacidad de establecer relaciones empíricas entre los resultados del test y la calidad de la capa superficial.

El martillo se calibra para direcciones de impacto horizontales; sin embargo, en algunos casos debido a la topografía del afloramiento los test pueden ser realizados en superficies inclinadas o aun verticalmente. En los casos diferentes a superficies horizontales todos estos R-valores de impactos en superficies no horizontales se deben corregir de acuerdo con tablas empíricas. Para los R-valores >70 no se realizan correcciones ya que el número de impactos no horizontales que superan el 70 es muy escaso y por ello no afectará al resultado final. Lecturas anormalmente grandes son raras pero pueden producirse, especialmente si se golpea un grano de cuarzo o feldespato. En general, los R-valores anormalmente bajos son los más comunes. Esto suele ser causado por la rotura de un grano suelto o un ligero desplazamiento del émbolo del Martillo de Schmidt. Todas las medidas se toman a ser posible con el martillo en perpendicular a la superficie medida, al menos a seis centímetros de juntas y cavidades y en superficies planas libres de polvo. Además, se deben evitar los líquenes y placas o escamas parcialmente sueltas.

Se debe tomar un número variable de medidas al azar en una área representativa para cada superficie, a partir de las cuales se calcula el R-valor. Las comparaciones se hacen entre los R-valores medios del cien por cien de las lecturas aunque algunos autores emplean el 50 por ciento de las lecturas o el 80 por ciento, para evitar la influencia de mediciones anómalas en el cálculo final de la media. Se ha comprobado que es más preciso utilizar el cien por cien de los valores, incluidos los extremos, lo que no cambia la media de forma apreciable.

El Martillo de Schmidt establece la relación entre el grado de alteración y el tiempo para una superficie rocosa expuesta a la meteorización y la combinación con los nucleidos cosmogénicos determinados sobre la misma superficie permite establecer una escala cronológica absoluta para los procesos de alteración. En general, cualquier superficie rocosa en la Tierra, excepto que se trate de ambientes con una baja tasa de alteración (p. ej. la Antártida), está sujeta a un continuado proceso de meteorización. Hasta que el uso de los nucleidos cosmogénicos no se ha generalizado, el Martillo de Schmidt ha sido utilizado principalmente por los geógrafos físicos para tratar de establecer una cronología relativa de superficies por su grado de alteración. La combinación de ambos métodos (S.H y N.C.) se ha revelado recientemente como un método muy útil para datar superficies rocosas erosivas o aun de alteración tan antiguas como la superficie más antigua datada por nucleidos cosmogénicos. Los métodos que utilizan los nucleidos cosmogénicos terrestres permiten obtener la pareja de valores R-valores y edad cosmogénica con gran fiabilidad. Y aun en el caso de que sobre las superficies hayan actuado los procesos de meteorización la aplicación de las dos técnicas permite cuantificar la tasa de erosión durante intervalos de tiempo muy prolongados y en muy diversos medios.

¿Con qué profesionales se relaciona?

El geomorfólogo se relaciona principalmente con otros geólogos, ingenieros de Caminos Canales y Puertos, ingenieros de Minas, geógrafos, biólogos, arqueólogos, planificadores del uso del terreno, astrogeólogos, policía, etc.

¿Quiénes son sus clientes principales?

Consultoras de ingeniería del medio ambiente, consejerías de Ordenación y Planificación del Territorio, Ministerio y consejerías de Medio Ambiente, ayuntamientos, Ministerio de Defensa, servicios de inteligencia, agencias espaciales (NASA, ESA), etc.

Referencias bibliográficas

Betts, M. W. y Latta A. (2000). Rock surface hardness as an indication of exposure age: an archaeological application of the Schmidt Hammer. *Archaeometry* 42: 209-223.

Díaz del Olmo, F.; Díaz del Río, V.; Goy, J. L.; Gutiérrez Elorza, M.; Martín Serrano A.; Martínez Pisón, E.; Pedraza, J.; Peña Monné, J. L.; Pérez González, A.; Pol Méndez, C.; Quirantes, F.; Rodríguez Vidal, J.; Sala, M.; Somoza, L.; Ugarte, F. M. y Zazo, C. (1994). *Geomorfología de España*. Rueda, Madrid.

Díez Herrero, A. y Martín Duque, J. F. (2005). *Las raíces del paisaje*. Junta de Castilla y León.

Dunai, T. J. (2000). Scaling factors for production rates of in situ produced cosmogenic nuclides: a critical reevaluation. *Earth and Planetary Science Letters* 176: 157-169.

Dunne, J.; Elmore, D. y Muzikar, P. (1999). Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces. *Geomorphology* 27: 3-11.

Engel, Z. (2007). Measurement and age assignment of intact rock strength in the Krkonose Mountains, Czech Republic. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 51 Suppl.1: 69-80.

Fernández Mosquera, D. (2002). *Geomorfología de superficies graníticas a través de ^{21}Ne en cuarzo*. Tesis doctoral no publicada. Universidade da Coruña.

Fernández Mosquera, D.; Marti, K.; Vidal Romaní, J. R. y Weigel, D. (2000). Late Pleistocene deglaciation chronology in the NW of the Iberian Peninsula using cosmic-ray produced ^{21}Ne in quartz. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B* 172: 832-837.

Gosse, J. C. y Phillips, F. M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews* 20: 1475-1560.

Goudie, A. S. (2006). The Schmidt Hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography* 30: 703-718.

Gutiérrez Elorza, M. (2001). *Geomorfología climática*. Omega, Barcelona.

Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Educación, Madrid.

Katz, O.; Reches, Z. y Roegiers, J. C. (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 37: 723-728.

Kohl, C. P. y Nishiizumi, K. (1992). Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 3583-3587.

Lal, D. (1991). Cosmic ray labelling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters* 104: 424-439.

Martín Serrano, M. (ed.) (2005). Mapa Geomorfológico de España y del Margen Continental E 1:1.000.000. Ministerio de Educación y Ciencia. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Martín-Serrano, A.; Salazar, A.; Nozal, F. y Suárez, A. (2008). Mapa geomorfológico de España, escala 1:50.000-Guía para su elaboración (CD). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

McCarroll, D. (1989). Potential and limitations of the Schmidt Hammer for relative-age dating; field tests on Neoglacial moraines, Jotunheimen, southern Norway. *Arctic and Alpine Research* 21: 268-275.

McCarroll, D. (1991). The Schmidt Hammer, weathering and rock surface-roughness. *Earth Surface Processes and Landforms* 16: 477-480.

McCarroll D. (1992). A new instrument and new techniques for the field measurement of rock surface roughness. *Zeitschrift für Geomorphologie* 36: 69-79.

Niedermann, S. (2000). The ^{21}Ne production rate in quartz revisited. *Earth and Planetary Science Letters* 183 : 361-364.

Niedermann, S.; Graf, T. Y. y Marti, K. (1993). Mass spectrometric identification of cosmic-ray-produced neon in terrestrial rocks with multiple neon components. *Earth and Planetary Science Letters* 118: 65-73.

Niedermann, S.; Graf, T.; Kim, J. S.; Kohl, C. P.; Marti, K. y Nishiizumi, K. (1994). Cosmic-ray-produced ^{21}Ne in terrestrial quartz: the neon inventory of Sierra Nevada quartz separates. *Earth and Planetary Science Letters* 125: 341-355.

Pérez-González, A.; Cabra, P.; Martín-Serrano, A.; Capote, R.; De Vicente, G.; Rubio, J. M.; Gallardo, J.; Martín de Vidales, J. L.; Aguirre, E.; Santoja, M.; Vidal Romaní, J. R.;

Hoyos, M.; Serrat, D.; Gutiérrez Elorza, M.; Peña Monne, J. L.; Molina, E.; De Pedraza, J.; Rodríguez Vidal, J.; Díaz del Olmo, F.; Goy, J. L.; Zazo, C.; Baena, J.; Del Olmo, P.; Meco, J.; Rey, J.; Medialdea, T.; Peralta, M.; Díaz, L. A. y Calderón, V. (1989). Mapa del Cuaternario de España, escala 1:1.000.000. ITGE, Madrid.

Shakesby, R. A.; Matthews, J. A. y Geraint, O. (2006). The Schmidt hammer as a relative-age dating tool and its potential for calibrated-age dating in Holocene glaciated environments. *Quaternary Science Reviews* 25: 2846-2867.

Small, E. E.; Anderson, R. S.; Repka, J. L. y Finkel, R. (1997). Erosion rates of alpine bedrock summit surfaces deduced from in situ ^{10}Be and ^{26}Al . *Earth and Planetary Science Letters* 150: 413-425.

Twidale, C. R. y Vidal Romaní, J. R. (2005). *Landforms and Geology of Granite Terrains*. A. A. Balkema Publishers, Ámsterdam.

Vidal Romaní, J. R. y Twidale, C. R. (1998). *Formas y paisajes graníticos*. Universidade da Coruña.

Vidal Romaní, J. R.; Fernández Mosquera, D.; Martí, K. y Brum Ferreira, A. (1999). Nuevos datos sobre la cronología glacial pleistocena en el NW de la Península Ibérica. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 24: 7-30.

Vilaplana, J. M. (1987). *Guia dels paisatges granítics del país catalans*. Capel, Madrid.

White, K.; Bryant, R. y Drake, N. (1998). Techniques for measuring rock weathering: application to a dated fan segment sequence in Southern Tunisia. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 1031-1043.

El geólogo paleontólogo

María Isabel Gómez García
Geóloga-paleontóloga

Para qué sirve la paleontología

La palabra paleontología se compone de tres raíces procedentes del griego: palaiós, "antiguo"; ontós, "el ser, lo que es", y logos, "tratado, fundamento, razón".

La paleontología, la ciencia que estudia, identifica y clasifica los restos fósiles, incluyendo las señales de actividad orgánica, ha evolucionado desde una ciencia descriptiva a una ciencia analítica, usada para interpretar la relación entre la Tierra y la historia de la vida. La clave del papel actual de la paleontología es el estudio de la evolución de la Tierra, la vida y los procesos medioambientales. Algunas de sus aplicaciones actuales están en la defensa del patrimonio, la búsqueda de recursos mineros y energéticos y la obra civil.

Entre las distintas definiciones de paleontología podemos recordar las siguientes:

La paleontología es la ciencia que estudia los seres orgánicos que vivieron en épocas pretéritas sobre la Tierra bajo todos sus aspectos y en especial busca sus posibles relaciones mutuas o con el medio ambiente que se desarrollaron y su ordenación en el tiempo. Este estudio es posible gracias a los restos de tales organismos, los fósiles, que han llegado hasta nosotros formando parte de las rocas (sedimentarias) y se han conservado en el transcurso de los tiempos geológicos. Puede, por tanto, definirse como la ciencia que se ocupa del estudio de los fósiles a la luz de lo que observamos en los animales y vegetales actuales (B. Meléndez, 1970).

El objetivo de la paleontología es el estudio de los seres vivos que han existido en las distintas épocas geológicas a través de sus restos fósiles, para poder investigar el modo de vida y la evolución de los organismos a lo largo del tiempo. El mejor conocimiento de los procesos de fosilización contribuye a interpretar los restos fósiles y situarlos en el conjunto de los seres vivos, además de asignarlos a un momento dado de la escala geocronológica. Es de interés fundamental conocer las relaciones entre los organismos y de éstos con su medio, la distribución espacial de los organismos, su distribución temporal y su integración en el contexto de la evolución orgánica (López y Truyols, 1994).

La paleontología es la ciencia que estudia la vida sobre la Tierra en el pasado geológico. La herramienta principal para este estudio la constituyen los fósiles que se extraen de las rocas. Actualmente se considera fósil cualquier resto de organismo o de actividad orgánica que esté contenido en el registro geológico. En la mayoría de los casos pertenecen a rocas sedimentarias, pero también se encuentran en rocas volcánicas e incluso en rocas metamórficas (Domènech y Martinell, 1996).

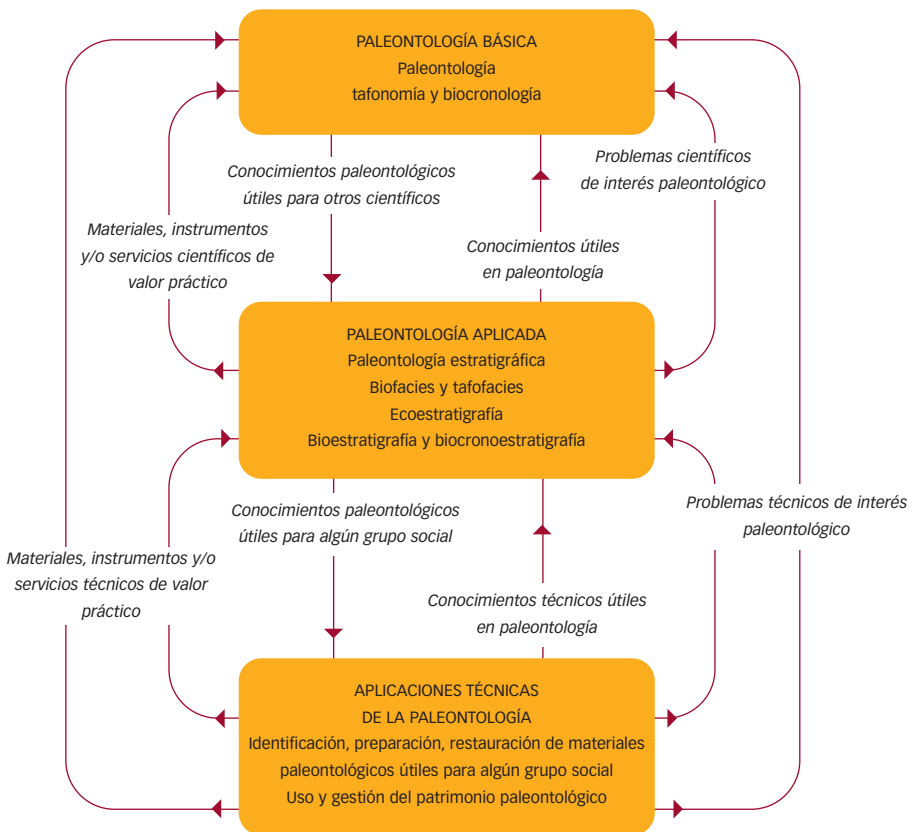
A estos objetivos de carácter básico se añaden otros objetivos de carácter aplicado. Para conseguirlos, los paleontólogos se sirven de la geología, por lo que es necesario que el paleontólogo tenga amplios conocimientos sobre los procesos y materiales geológicos, al tiempo que se actúa como un elemento auxiliar de la geología proporcionando importantes datos acerca de la formación de los estratos geológicos, el clima de épocas pasadas y la edad relativa de las rocas.

La paleontología se basa en la paleobiología y en la tafonomía. En el primer caso su trasfondo específico se encuentra en la neontología y en la tafonomía, y en el segundo se encuentra en la paleobiología, la estratigrafía y la petrología (entre otras ciencias geológicas). En particular, la tafonomía se ocupa del estudio de los procesos de fosilización y de la formación de los yacimientos fósiles. Se trata de un subsistema conceptual de la paleontología que aspira a explicar cómo ha sido producido y qué modificaciones ha experimentado el registro fósil. Estos temas son de interés para el desarrollo de diferentes áreas del conocimiento científico, como la paleontología, estratigrafía, sedimentología, geoquímica, geología regional, biología, arqueología y medicina forense, entre otras, y han pasado a ser en los últimos años de mayor interés social por su relevancia para plantear y resolver problemas de conservación, uso y gestión del patrimonio geológico y paleontológico (Fernández, 2000).

Contenidos de la paleontología

La paleontología comprende el estudio de los vegetales, conocida como paleobotánica, y de los animales, conocida como paleozoología, que podemos dividir en vertebrados e invertebrados. Asimismo, éstas, a su vez, poseen otras divisiones:

- ▶ Paleontología cuantitativa: es el estudio estadístico de las poblaciones fósiles.
- ▶ Paleobiogeografía: estudia la distribución biológica durante el pasado.
- ▶ Paleoecología: reconstruye el ambiente en que vivieron los organismos que hoy consideramos fósiles.
- ▶ Paleopatológica: estudia las anomalías (deformaciones, enfermedades, etc.) en los restos fósiles.
- ▶ Micropaleontología: estudio de restos fósiles microscópicos de organismos desaparecidos.



¿Qué es la bioestratigrafía?

La bioestratigrafía ordena las unidades litológicas en función de su contenido fósil, permitiendo la correlación de dos unidades estratigráficas separadas en el espacio, con la base del Principio de Identidad Paleontológica, que consiste en admitir que un conjunto de estratos del mismo contenido paleontológico es de la misma edad.

Se denomina biozona a un estrato o conjunto de estratos caracterizados por el contenido de ciertos taxones o por una asociación de taxones. La cronozona representa toda la unidad litológica depositada en el transcurso del tiempo en que la especie vivió.

Historia de la paleontología

El conocimiento de los fósiles, ligados al desarrollo de las ciencias y el pensamiento humano, se puede dividir en tres grandes épocas: clásica; medieval y moderna.

En la época clásica, se mezcla la mitología con las ideas científicas:

- ▶ Escuela pitagórica: el hallazgo de fósiles marinos evidenciaba que el mar habría recubierto antiguamente aquellas zonas.
- ▶ Escuela aristotélica: concebía estos fósiles como casos de generación espontánea.

En la época medieval, el médico árabe Avicena (siglo X) atribuía a una fuerza creadora (vis plastica) la capacidad de las rocas para producir estas formas, pero sin insuflarles vida.

En la época moderna se produjeron hitos muy importantes:

- ▶ Leonardo da Vinci, a finales del siglo XV, estudió los procesos de fosilización y de sedimentación.
- ▶ Sus seguidores del siglo XVII establecieron las bases de la estratigrafía y de la paleontología.
- ▶ Cuvier, considerado el fundador de la paleontología moderna, fue el primero en usar la anatomía comparada y en hablar de migraciones geográficas.
- ▶ El geólogo W. Smith descubrió la aplicación de los estudios paleontológicos en geología y las bases de la paleontología estratigráfica.
- ▶ Darwin, en 1859, con su obra *El origen de las especies*, proporcionó las pruebas para la demostración de la evolución.
- ▶ Actualmente, Gould, Eldredge o Stanley son los abanderados de la teoría neodarwinista de la evolución saltacionista.

La paleontología hoy

Los cambios que se han producido en las últimas décadas en el mercado laboral, la incorporación masiva de la mujer, la adaptación de las nuevas tecnologías y la mayor exigencia de flexibilidad, calidad y responsabilidad social, han planteado un reto a todos los profesionales; especialmente, ha sido significativa la necesaria adaptación al mercado laboral de aquellas profesiones de gran tradición histórica, basadas en la importancia del avance del conocimiento, a las que actualmente se les exige que, además, presenten a la sociedad un rendimiento económico tangible, que en algunos casos, como en la profesión de paleontólogo, podemos englobar en una contribución al desarrollo social sostenible.

Así, la profesión de paleontólogo, de la que podemos encontrar sus orígenes en la Grecia clásica, ha visto necesario realizar una adaptación mercantilista a su contribución profesional, aportando un valor añadido en la cadena económico-social que garantiza el gran prestigio que la precede.



Figura 1. Sucesión del tránsito Triásico-Jurásico en Bárzana (Asturias). Obra de autopista que dejó al descubierto una cantera donde se pueden observar los materiales del tránsito Triásico-Jurásico y ha sido posible estudiar por primera vez en España la extinción masiva del Triásico superior, que es una de las más importantes de todo el Fanerozoico.

En relación con las aplicaciones técnicas de la paleontología, además de la importante labor de conservación y divulgación del patrimonio, que se realiza en museos y parques temáticos, se debe hacer referencia a ella como motor de desarrollo de una región con la protección, gestión o difusión del patrimonio paleontológico.

Como acciones de interés social podemos destacar:

- ▶ Patrones mundiales o nacionales de interés paleontológico.
- ▶ Secciones tipo de unidades estratigráficas.

- ▶ Sitios paleontológicos de interés social como motor de desarrollo sostenible de una región.
- ▶ Obras civiles de gran entidad, relacionadas con la Administración estatal, comunitaria o local.

Patrones mundiales o nacionales de interés paleontológico: GSSP, Global Geosites (o en su caso PIG o monumentos naturales)

El ejemplo más significativo de patrón mundial lo constituye la Sección de Fuentelsaz (Guadalajara), aceptada como estratotipo de límite del piso Aalenense y, en consecuencia, de la serie del Jurásico medio (es el único GSSP existente en España).

Está situado en un área deprimida, dentro del Señorío de Molina (Molina de Aragón, Guadalajara), muy cerca de los itinerarios turísticos que conducen al monasterio de Piedra o a las lagunas de Gallocanta, lo que da público para un centro de interpretación o a un museo paleontológico local que ayude al desarrollo social de la zona.

También se pueden considerar los Global Geosites. Por ejemplo, en el Mesozoico de la Cordillera Ibérica se acaban de proponer cinco de estos sitios, además de Fuentelsaz, hay uno del Triásico con gran interés paleontológico; uno en el Jurásico estrictamente bioestratigráfico y tres en el Cretácico, de notable interés paleontológico.

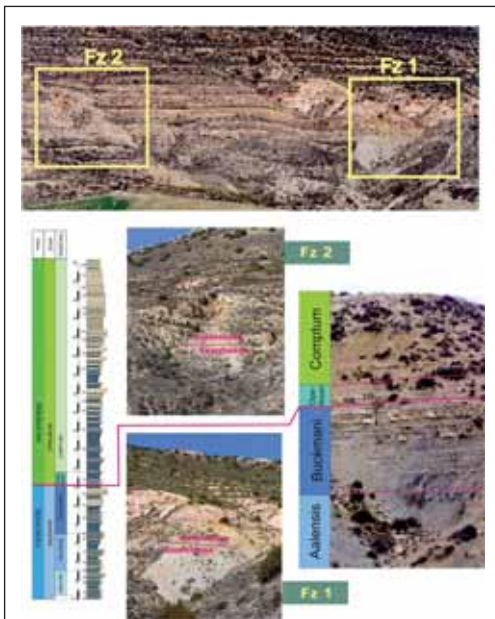


Figura 2. Sección de Fuentelsaz.

En algunas ocasiones, con fondos FEDER y los programas LIDER y PRODER para promover el desarrollo sostenible, en áreas más o menos deprimidas, se ha podido difundir el Patrimonio Natural de algunas zonas, incluido el paleontológico. Dos ejemplos de esto los tenemos en Hacinas (Burgos), donde ya se realizó el proyecto, o en Talveila (Soria) donde se está elaborando con la colaboración del alcalde de la localidad.



Figura 3. Árbol fósil del Cretácico de Hacinas (Burgos).

Grandes obras públicas

La legislación proteccionista de muchas comunidades autónomas —en aplicación de las competencias sobre cultura y medio ambiente que tienen transferidas— ha incidido en los últimos años sobre la actividad de arqueólogos y paleontólogos.

La necesidad de efectuar informes sobre el impacto ambiental de la obra y de aplicar la legislación sobre el patrimonio arqueo-paleontológico ha dado lugar a la

aparición de algunas empresas y consultorías especializadas en esta temática. En relación con este tipo de obras recientemente se han producido hallazgos de gran relevancia.

La construcción de la línea de alta velocidad Madrid-Cuenca ha permitido el hallazgo de un yacimiento paleontológico de alrededor de 80 Ma (Cretácico superior) en donde se han extraído más de ocho mil fósiles, entre los que podemos destacar: tres cráneos de dinosaurio prácticamente completos y un fémur de 1,60 metros de largo.

En este punto hay que destacar que la sociedad, en general, percibe como mejores aquellas empresas que se preocupan por los sectores desprotegidos de la sociedad, invierten en acción social, mejoran el entorno medioambiental, conservan su patrimonio histórico, a lo que hay que sumar el enorme interés de todos los descubrimientos paleontológicos —por ejemplo, Atapuerca, un yacimiento con dinosaurios, etc.— y, además, el consumidor particular o potencial cliente valora, cada vez más, en su intención de compra o elección de producto las inquietudes sociales y compromisos solidarios de las empresas en las cuales invierte.

En el pozo de ataque del by-pass norte de la calle M30 (Madrid), donde se montó y empezó a funcionar la tuneladora más grande del mundo (18 metros de diámetro de perforación), se excavó un pozo de unos 30 metros de profundidad. Se obtuvieron macro y microfósiles de gran interés que en la actualidad están siendo estudiados.

Otros ejemplos de yacimientos generados por las obras públicas, los tenemos en la Comunidad de Asturias, donde se excavó el famoso Túnel Ordovícico —ejemplo de inversión de las administraciones— con gran incidencia.



Figura 4. Tuneladora en el *by-pass* norte de la calle M30.



Figura 5. Ichnofósil de vertebrado: *Cheirotherium* en la Fm Limos y areniscas de Rillo de Gallo.

Algunos ayuntamientos, como el de Madrid, tienen recogidos desde la década de los ochenta, en su Plan General de Ordenación Urbana, varios sitios de interés geológico, entre los que al menos cuatro áreas están relacionadas con yacimientos paleontológicos (tres clásicos y uno reciente). De manera que cuando en las riberas del Manzanares o del Jarama se obtienen fósiles como consecuencia de una obra —en este caso suelen ser vertebrados— existe la posibilidad de que se haga una valoración de su interés por paleontólogos.

El yacimiento de Somosaguas, dentro del campus complutense es otro ejemplo de sitio paleontológico con relevancia social.

El trabajo que realiza

El paleontólogo es el profesional dedicado al estudio de los fósiles. Es una ciencia que se ocupa de reconstruir, entre otras actuaciones, sobre la base de esos restos, las características fisiológicas y morfológicas de los organismos que aparecen en el registro fósil. La paleontología sirve para saber el origen de cada especie (evolución) y su relación con otros organismos (filogenia). Asimismo, también sirve para interpretar las transformaciones geológicas, entre las que podemos mencionar la tectónica de placas por medio de la paleoecología, lo que es muy interesante para poder interpretar la adaptación de las especies y su adaptación en el medio ambiente. Por tanto, en las consecuencias que puede traer el cambio climático en la cadena trófica y, por supuesto, en el hombre.

En el Artículo 21 de los Estatutos del ICOG se recogen algunas de las competencias específicas de los paleontólogos:

- ▶ Organización y dirección de espacios naturales protegidos cualquiera que sea su grado de protección, parques geológicos y museos de ciencias.

- ▶ Estudio, evaluación, difusión y protección del patrimonio geológico y paleontológico español.
- ▶ Educación geológica, paleontológica y medioambiental. Geología educativa y recreativa.

Además de las competencias propias de la titulación de geólogo correspondiente a cada profesional, la especialización o Máster en Paleontología capacita de forma especial para efectuar actividades relacionadas con: el estudio, identificación y clasificación de restos fósiles; la educación geológica, paleontológica y medioambiental, así como la geología y la paleontología educativa y recreativa; el estudio, evaluación y protección del patrimonio geológico y paleontológico; la organización y dirección de espacios naturales protegidos, así como de parques geológicos, museos de ciencias y museos paleontológicos; los estudios de impacto ambiental; la identificación estudio y control de los fenómenos que afectan a la conservación del medio ambiente, la búsqueda de recursos energéticos y mineros y de apoyo a la obra civil.

Los resultados de las investigaciones en paleontología tienen una aplicabilidad directa en el desarrollo socioeconómico tanto regional como nacional; por ejemplo, el yacimiento de Atapuerca y Dinópolis como un centro turístico de nivel regional, nacional e internacional. Estos proyectos permiten desarrollar el área como un centro de investigaciones, de educación y turístico creando otras fuentes de trabajo e ingresos en el turismo paleontológico. Además del desarrollo económico de toda la infraestructura asociada al turismo; el comercio, la hostelería, restaurantes, etc.

Un ejemplo es el testimonio de Richard Leakey:

Soy Richard Leakey. He invertido muchos años en la búsqueda de fósiles que comencé siendo muy niño. Si bien es cierto que la mayor parte del tiempo se emplea en localizar y recuperar los fósiles, también se hace mucho trabajo en esta tienda. Por ejemplo, cuando traen los restos al campamento, tenemos que numerar y registrar las partes de cada ejemplar, y si algunos de los fósiles están rotos, tenemos que intentar reconstruir y pegar las piezas.

Las carreteras que nos llevan de vuelta al museo en Nairobi son muy malas y muchos de estos fósiles son frágiles. Hay que embalarlos con mucho cuidado antes de emprender el viaje por tierra hasta Nairobi.

Es realmente asombroso cómo conseguimos encontrar los fósiles o las huellas de las criaturas que vivieron hace tanto tiempo. A menudo, la gente quiere saber cómo es de dura la tarea de encontrar un fósil. Aquí, en Kenia, morían muchos animales cerca del lago y las inundaciones finalmente depositaron sus

restos en la misma orilla. Allí, los huesos se cubrieron de limo y de arena que, a lo largo de los años, se acumuló en capas cada vez más gruesas. La erosión posterior ha dejado estas capas al descubierto y, así, los restos conservados de los animales salen a la superficie. Esos restos son los que buscamos.

Es de suma importancia saber de dónde vienen los fósiles y, además, poder integrarlos en un esquema temporal. Muchos de los emplazamientos de África oriental tienen la gran ventaja de que las capas de sedimentos se intercalan con materia volcánica, que puede datarse de forma muy precisa mediante una técnica que se denomina datación por el método de Potasio-Argón. Así, hemos podido llevar un registro fino de los cambios a través del tiempo, con unas fechas muy precisas que abarcan millones de años.

Uno de nuestros principales intereses ha sido el estudio de nuestros antepasados —los fósiles de los humanos primitivos—. También recolectamos fósiles de todas las demás criaturas que vivieron en el mismo período que nuestros ancestros. Este aspecto es muy importante, pues nos permite reconstruir el entorno. Necesitamos saber cómo vivían nuestros antepasados, cómo era su medio ambiente y, de esta manera, quizás lleguemos a relacionar los cambios en nuestros ancestros con los cambios ambientales.

Hay un reto fundamental al que nos enfrentamos: comprender el porqué del desarrollo de los humanos. En este sentido, necesitamos vincular el cambio en el entorno con el cambio físico de nuestros antepasados. Por ejemplo, ¿por qué desarrollamos unos cerebros tan grandes? Y hay una pregunta aun más importante: ¿por qué nos convertimos en bípedos? Pues bien, los fósiles de los animales que compartían el medio de los humanos pueden ofrecernos la clave, pues permiten que nos hagamos una magnífica idea de la evolución de las costumbres y de los cambios a largo plazo en la naturaleza.

Un segundo ejemplo es el funcionamiento en un yacimiento de dinosaurios en la Patagonia:

Una vez que las áreas fosilíferas son detectadas procedemos a la ubicación de las mismas en un mapa. Aquellos materiales detectados que se encuentren en peligro potencial serán inmediatamente extraídos y serán prioritarios en el momento de decidir su extracción. En el campo se realizarán los estudios geológicos correspondientes para ubicar estratigráficamente cada uno de los hallazgos y se procederá al muestreo o extracción de los materiales para su investigación y posterior preservación en las instituciones adecuadas. El estudio de los materiales fósiles en general comprenderá su descripción anatómica y

sus relaciones filogenéticas. Todos los materiales extraídos pasarán a engrosar las colecciones del Centro Paleontológico Lago Barreales bajo la órbita de la Universidad Nacional del Comahue en Neuquén. Algunos materiales podrán ser evaluados para ser dejados en el campo con el objeto de que sean posteriormente utilizados como un recurso turístico y que permita el desarrollo económico de la zona en la que se encuentra. Cabe aclarar que se evaluarán todas las condiciones para establecer si el fósil puede ser utilizado con ese fin. Por otro lado, se proseguirá con la excavación en el sitio Futalognko, el más rico hallado hasta ahora en Patagonia.

Los esqueletos de dinosaurios se reconstruyen (es decir, se montan y se sujetan siguiendo el ordenamiento correcto de los huesos y en una posición natural) por dos motivos. En primer lugar, para exhibirlos; en segundo lugar, para realizar estudios científicos.

El paleontólogo que observa los huesos diseminados, durante el trabajo de campo, por lo general hace una evaluación aproximada del hallazgo, de lo completo que está y del tipo que representa.

En el laboratorio, tras meses de preparación, está en condiciones de verificar su hipótesis y de decidir acerca del futuro del espécimen.

En esta etapa, las decisiones son fundamentales. Si se lo va a exponer, la tarea de montar el esqueleto y de presentarlo suele llevar semanas de trabajo especializado, lo que implica un gasto considerable. Si parece que el esqueleto pertenece a una especie de dinosaurio completamente desconocida, o si contiene partes de un esqueleto de un dinosaurio conocido pero que no se habían visto antes, resulta importante transmitir la información a otros científicos. Esta circunstancia también implica una gran inversión de tiempo y de dinero (en general más que si sólo se preparase el ejemplar para su exhibición). Habitualmente, un esqueleto bien conservado y bastante completo requiere del trabajo del paleontólogo durante dos o tres años, y de un año, más o menos, por parte del artista científico (que a menudo son la misma persona). Es posible que un esqueleto nuevo de dinosaurio sea objeto de estudios científicos al mismo tiempo que se lo prepara para su exhibición.

La mayoría de los huesos que pasan por un laboratorio de dinosaurios se dejan aparte para un estudio posterior. Todos tienen algún valor científico y educativo, pero resulta imposible examinarlos enseguida. Los grandes museos de dinosaurios poseen cientos o miles de especímenes almacenados y listos para analizar.

Esto podría parecer un gran desperdicio de ejemplares interesantes, pero ni siquiera las personas más aficionadas a los dinosaurios están dispuestas a mirar docenas de huesos iguales; así, sólo se exhiben los mejores. Los huesos que se almacenan se pueden considerar archivos de información, al alcance de cualquier investigador serio que intente resolver algún problema científico.

Los grandes museos de dinosaurios albergan cada mes a docenas de científicos visitantes: estos visitantes están interesados en estudiar especímenes concretos que figuran en los catálogos de las colecciones. Si un científico estudia los dientes del carnívoro gigantesco *Tyrannosaurus*, necesitará ver cientos de mandíbulas y dientes de este animal y de sus familiares, que pueden estar dispersos en varios museos de cada continente. Es posible que otra paleontóloga esté tratando de identificar un esqueleto nuevo y poco común que ha encontrado en Francia. Tiene que visitar colecciones situadas en todas las partes del mundo con el fin de comparar los huesos nuevos con otros similares que se encuentren en algún otro lugar. Tal vez un tercer paleontólogo procure comprender la dinámica de una determinada población de dinosaurios, y a tal efecto se ve obligado a registrar todo lo que se ha hallado en una determinada formación rocosa; es posible que estos ejemplares se encuentren distribuidos en museos muy alejados entre sí.

Los esqueletos de los dinosaurios están montados por los técnicos de los museos, sobre estructuras realizadas por los ingenieros, bajo la mirada atenta de un paleontólogo que dirige la operación. El paleontólogo conoce cada uno de los huesos gracias a la experiencia obtenida en el estudio de otros esqueletos. Todo dinosaurio, por grande o pequeño que sea, tiene un fémur, unos omóplatos, vértebras caudales, y demás huesos que se pueden comparar entre sí. Con semejante experiencia, no hay muchas probabilidades de unir los huesos de forma equivocada; de poner, por ejemplo, la cabeza en el extremo de las vértebras caudales en lugar de las cervicales, aunque esto haya ocurrido alguna vez. El paleontólogo cuenta también con los mapas y fotografías de campo que le ayudan a poner en su sitio los huesos que sean cuestionables. Por lo general, sólo hay problemas cuando los huesos están estropeados, o cuando faltan algunos.

Cuando se han dispuesto los huesos en su posición anatómica correcta, el ingeniero diseña y construye una armadura, que es el marco metálico sobre el cual se montarán los huesos.

Los principios de la construcción varían, según se utilicen en el montaje los huesos originales o copias. Las piezas fundidas son mucho más ligeras y por lo tanto necesitan menos apoyo, y se pueden insertar tornillos o varillas pequeñas en las diferentes partes, con total impunidad. Además, de una copia de un esqueleto se puede realizar un "montaje invisible", formado por varillas internas.

Los armazones tradicionales para sujetar los huesos en su sitio suelen estar hechas de piezas de acero situadas debajo de cada hueso.

Estas piezas se calientan a altas temperaturas para que adopten la forma exacta, y a continuación se sujetan sobre pilares verticales.

Las piezas y los pilares se diseñan con la mayor discreción posible, de modo que en general queden ocultos por los huesos cuando se monte el esqueleto para su exposición; pero al mismo tiempo han de ser capaces de soportar el enorme peso de los huesos fósiles. Una técnica más reciente consiste en sujetar cada hueso, sobre todo las vértebras, sobre fuertes hilos transparentes suspendidos del techo de la sala de exposición. De este modo, se evita la necesidad de una armadura compleja, y se pueden levantar los huesos para realizar un estudio individual.

Los centros paleontológicos permiten al público conocer el trabajo del paleontólogo en el terreno y la fauna y flora fósil en su lugar de origen con aval científico permanente.

Una de las prioridades de estos centros es mantener e incrementar el conocimiento científico, mostrando la fauna y flora fósil de la región.

Es también importante difundir los conocimientos científicos a la sociedad, ya sea a través de exhibiciones, conferencias, publicaciones o divulgación general, convirtiendo a los yacimientos paleontológicos en un área de investigación, educación, cultura y turismo.

Como ejemplo, analizaremos las competencias del paleontólogo del petróleo en los sistemas de análisis petrolíferos:

- Bioestratigrafía y cronoestratigrafía. Una de las claves fundamentales en los sistemas de análisis petrolíferos es la datación, fundamentalmente, la datación cronoestratigráfica: análisis bioestratigráfico y correlación.

La resolución en ambientes marinos de la datación cronoestratigráfica es de +/-1 Ma. También se han empleado dataciones con restos de vertebrados en ambientes no-marinos, como por ejemplo, en las dataciones de secuencias de molasas en Transcaucasia e Irán.

Es interesante resaltar el papel de algunos biomarcadores, por ejemplo C11-C19, derivado de las cyanophitas como índice dentro del Ordovícico.

- ▶ Interpretación paleoambiental. Otro parámetro importante es la interpretación medioambiental: la paleobatimetría, la paleobiogeografía, modelos secuenciales y las palinofacies.
- ▶ Paleobatimetría. Esencialmente basada en la distribución de foraminíferos que caracterizan la profundización de los sedimentos.
 - No marinos: algas, diatomeas y ostrácodos (aguas dulces), y pólenes y esporas (continentales).
 - Marinos: neríticos, batial y abisal.

Adicionalmente e independientemente de la profundidad, se puede caracterizar con micropaleontología o palinología ambientes anóxicos o disóxicos. Por ejemplo, zonas con mínimos de oxígeno pueden ser caracterizados por foraminíferos infaunales bentónicos.

- ▶ Paleobiogeografía. Se estudia la paleobiogeografía y la palinofacies.

Los conocimientos que aporta

La paleontología es la ciencia que estudia las evidencias de la vida en el pasado. Éstas quedan registradas como fósiles y estos restos de vida antigua se preservan en los cuerpos rocosos dando información de edad, condiciones medioambientales y evolución.

Un paleontólogo puede estudiar desde las bacterias hasta los dinosaurios más gigantes y los restos fósiles pueden tener desde miles de millones de años hasta apenas unos pocos miles de años.

Un paleontólogo también puede aplicar otras ciencias básicas para el estudio de los fósiles. Estudios químicos de elementos estables o isótopos radiactivos en belemnites pueden brindar información sobre la temperatura del mar, el clima y los ambientes en tiempos pasados. Estudios matemáticos de poblaciones fósiles pueden mostrar la estructura de comunidades antiguas o la naturaleza de las extinciones. También se puede estudiar la secuencia de especies fósiles a lo largo del tiempo y el espacio y utilizar esa información en el estudio de las antiguas geografías de los continentes o la correlación de rocas depositadas en forma contemporánea en masas continentales distantes. Los fósiles se utilizan para proveer edades relativas de las rocas donde se los recupera. En general, hay una gran

variedad de tópicos entre unos más geológicos como la bioestratigrafía y el análisis paleoambiental y otros más biológicos como los estudios de ontogenias y filogenias.

Desde el punto de vista geológico, el hallazgo de determinados fósiles característicos, propios de un periodo, en capas de terreno discontinuas y alejadas, posibilita la correlación de las edades relativas de los estratos. La paleontología se halla en la base de la evolución, de la zoología y de la botánica. Se entronca, además, directamente con la genética, con la embriología y con la ontogenia, posibilitando a su vez la taxonomía y la filogenia. La paleontología, por tanto, contribuye al avance del conocimiento científico ya que consiste en ciencia básica, que impacta fundamentalmente en temáticas vinculadas a la geología regional, estratigrafía, ecología histórica, paleobiogeografía, paleoambientes sedimentarios, evolución y relaciones filogenéticas de las faunas estudiadas.

La paleontología, como definía S. Fernández (2000), son temas de interés para el desarrollo de diferentes áreas del conocimiento científico, como la estratigrafía, sedimentología, geoquímica, geología regional, biología, arqueología y medicina forense, entre otras.

En los últimos años se ha desarrollado la paleontología por el gran interés social que conlleva, para plantear y resolver problemas de conservación, uso y gestión del patrimonio geológico y paleontológico, así como para plantear y resolver problemas medioambientales y de apoyo a la obra civil.

La paleontología puede disponer de una serie de testimonios sobre los efectos de determinadas causas que ilustran la historia de la Tierra, y de sus componentes que la ecología complementa.

Los paleontólogos consiguen la mayoría de la información mediante el estudio de los fósiles encontrados en depósitos de rocas que forman estratos y que se han ido sucediendo durante millones de años.

Herramientas que utiliza

¿Qué es un fósil?

Según la definición más habitual, un fósil es: "Cualquier resto de organismo o de actividad orgánica que esté contenido en el registro geológico".

En el proceso de fosilización los restos de organismos vivos o huellas de su actividad vital se transforman en piedra. Los poros son invadidos por moléculas de minerales como la calcita (carbonato de calcio) y son totalmente reemplazados. El agua pasa por

el sedimento que contenía al fósil y se deposita en los espacios de la estructura original del animal. Hay yacimientos excepcionales en que la planta o el animal queda enterrado de forma anóxica, logrando la conservación de partes blandas.

¿Qué tipo de fósiles se conocen?

Se conocen distintos tipos de fósiles:

- ▶ Estructura original: son aquellos en que las partes más duras y porosas han sido rellenadas, reemplazadas por sustancias minerales a través de millones de años, como carbonato de calcio o sílice.
- ▶ Reemplazo molecular: un ejemplo de este fenómeno es la conservación de madera fósil. En este caso, la sílice expulsada por grandes erupciones volcánicas cubre enormes bosques en pocas horas. Asimismo, mientras pasa la sílice junto a otras sustancias químicas se reemplaza la estructura molecular.
- ▶ Moldes: se forman por la disolución o descomposición de la estructura original del organismo y el relleno por una sedimentación secundaria, que al endurecerse forman la réplica del organismo original.
- ▶ Restos momificados: se trata de animales que se han encontrado congelados, donde se han preservado la piel, órganos, pelos, etc., y que en su gran mayoría no superan los 30 mil años de antigüedad. Otros ejemplos válidos para este tipo de fosilización son las resinas fosilizadas (conocidas como ámbar) donde aparecen algunos insectos conservados. Lo llamativo de estos ejemplos es que se ha podido rescatar la estructura molecular de las diferentes especies.
- ▶ Excrementos fósiles: son conocidos como “coprolitos”, que suelen estar compuestos por partes duras que no pudieron descomponerse. Otros restos parecidos son las regurgitaciones (vómitos) naturales, realizados por ciertos animales. En ambos casos podemos saber de qué se alimentaban algunas especies.
- ▶ Improntas: son las huellas o moldes fósiles que pueden quedar sobre el cuerpo rocoso. No se observa la estructura original del organismo, sino el espacio dejado por el animal antes de descomponerse.
- ▶ Icnitas: son las huellas dejadas por distintos animales en un material blando. Los rasgos de icnitas permiten a los paleontólogos estudiar la biomecánica y la velocidad de especies extinguidas.

¿Cómo sabemos su antigüedad?

Con las técnicas disponibles hasta el siglo XIX sólo se podía establecer una escala de tiempo relativa, basada en el Principio de Superposición, el Principio de Continuidad y el Principio de Identidad Paleontológica. Así, la edad de la Tierra y la duración de las

unidades de esta escala permanecieron desconocidas hasta principios del siglo XX. Poco después del descubrimiento de la radiactividad, se desarrollaron los métodos físicos de datación (radiactividad, magnetismo). Con ellos, se pudo calibrar la escala relativa de tiempo geológico creando una cronología absoluta.

Cronología relativa

La escala relativa se fundamenta en los principios de Superposición, Continuidad e Identidad Paleontológica.

- ▶ Principio de Superposición: en las capas dispuestas horizontalmente, la capa superpuesta a otra es la más reciente e inversamente.
- ▶ Principio de Continuidad: una misma capa es de la misma edad en todos sus puntos.
- ▶ Principio de Identidad Paleontológica: un conjunto de estratos del mismo contenido paleontológico es de la misma edad.

Cronología absoluta

- ▶ Dendrocronología: se basa en la cantidad, la extensión y la densidad de los anillos anuales de crecimiento de árboles longevos, lo que permite datar los últimos dos mil o tres mil años.
- ▶ El análisis de varvas: es uno de los sistemas más antiguos para la determinación absoluta de edades. Fue desarrollado por científicos suecos a principios del siglo XX. Una varva es un lecho, o una sucesión de ellos, depositado en zonas de agua tranquila a lo largo de un año. Su cuenta y correlación se ha usado para medir edades de depósitos glaciales del Pleistoceno. Dividiendo la velocidad de sedimentación, en unidades por año, por el número de unidades depositadas después de un evento geológico.
- ▶ La datación radiométrica: las técnicas radiométricas se desarrollaron después del descubrimiento de la radiactividad en 1896. Los ritmos regulares de desintegración de los elementos radiactivos inestables permiten establecer patrones temporales. La teoría básica de esta técnica se fundamenta en que los elementos radiactivos, como el uranio (U) y el torio (Th), se desintegran de forma espontánea formando distintos isótopos del mismo elemento (los isótopos son átomos de cualquier elemento que difieren con respecto a él en su masa, pero que poseen sus mismas propiedades químicas y ópticas). Esta desintegración se acompaña de la emisión de radiación o partículas (rayos alfa, beta o gamma) desde el núcleo. Las técnicas de datación radiométrica se basan en que la cantidad transformada en un pequeño espacio de tiempo es proporcional a la cantidad de elemento. Desde que una cantidad de un elemento radiactivo se incorpora a un cristal de mineral en crecimiento, ésta

empieza a disminuir a un ritmo fijo, creándose un porcentaje determinado de productos derivados en cada intervalo de tiempo.

- ▶ El método del Carbono 14. Las técnicas de datación con radiocarbono, desarrolladas en un primer momento por el químico estadounidense Willard Frank Libby y sus colaboradores de la Universidad de Chicago, en 1947, suelen ser útiles para la datación en arqueología, antropología, oceanografía, edafología, climatología y geología reciente, ya que sólo son válidos para restos con una edad menor a 40 mil años.

Con qué profesionales se relaciona

Los paleontólogos se relacionan con biólogos (evolución), arqueólogos (defensa del patrimonio) o ingenieros (obra civil). Sin embargo, también existen relaciones con: físicos (geofísica), químicos (geoquímica), médicos (medicina forense), etc.

Quiénes son sus principales clientes

El principal cliente del paleontólogo es la sociedad, tanto en su fórmula como ciencia básica, y cómplice en la ampliación del conocimiento científico, como en paleontología aplicada, siendo sus principales actuaciones en el campo de la protección del patrimonio, medio ambiente y obra civil, pensamos en: el hombre, su evolución y la repercusión que sobre su hábitat puede producir el cambio climático.

No obstante, la paleontología da servicio a: estratígrafos, sedimentólogos, geoquímicos, geólogos regionalistas, biólogos, arqueólogos, ingenieros y médicos forenses.

Referencias bibliográficas

Aubouin, J.; Brouse, R. y Lehman, J. P. (1981). Paleontología, estratigrafía. Tratado de Geología. Omega, Barcelona.

Domènech, R. y Martinell, J. (1996). Introducción a los fósiles. Masson, Barcelona.

Ortega, F.; Sanz, J. L; Barroso-Barcenilla, F.; Cambra-Moo, O.; Escaso, F.; García-Oliva, M. y Marcos Fernández, F. (2008). El yacimiento de macrovertebrados fósiles del Cretácico Superior de "Lo Hueco" (Fuentes, Cuenca). *Palaeontologica Nova*. SEPAZ (8).

Wynn Jones, R. (2006). *Applied Palaeontology*. Cambridge University Press.

Mujeres y geología en España

M. I. Gómez. Vicesecretaria. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG)

A. M. Alonso-Zarza. Facultad de CC Geológicas. IGE. CSIC-Universidad Complutense de Madrid

J. Álvarez-Marrón. Instituto Jaime Almera, CSIC

A. Calonge. Universidad de Alcalá

C. Díaz. Consejera de Investigación en la Representación permanente de España ante la Unión Europea

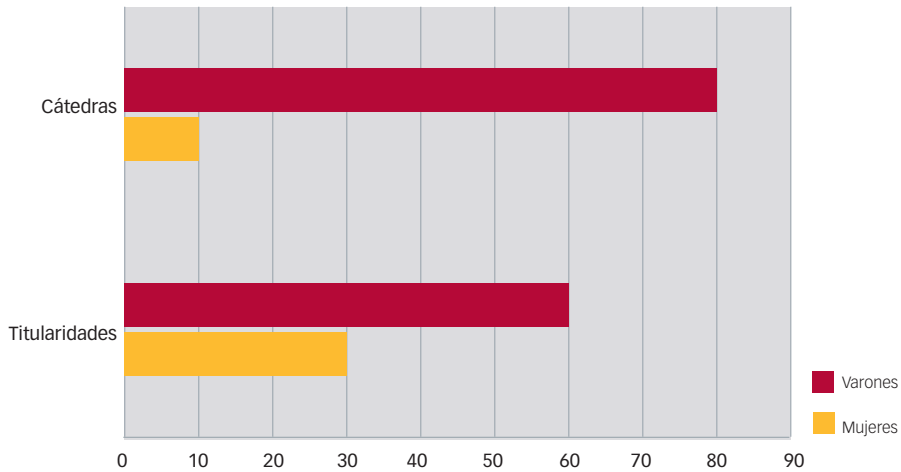
M. A. Díez-Balda. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca

I. Gil-Peña. Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

El deseo y la lucha por constituir modelos académicos y profesionales a los que poder emular en el amplio panorama social existente es hoy, en el siglo XXI, un reto y un homenaje a aquellas pioneras de la geología que con esfuerzo y tesón rompieron barreras sociales a priori infranqueables.

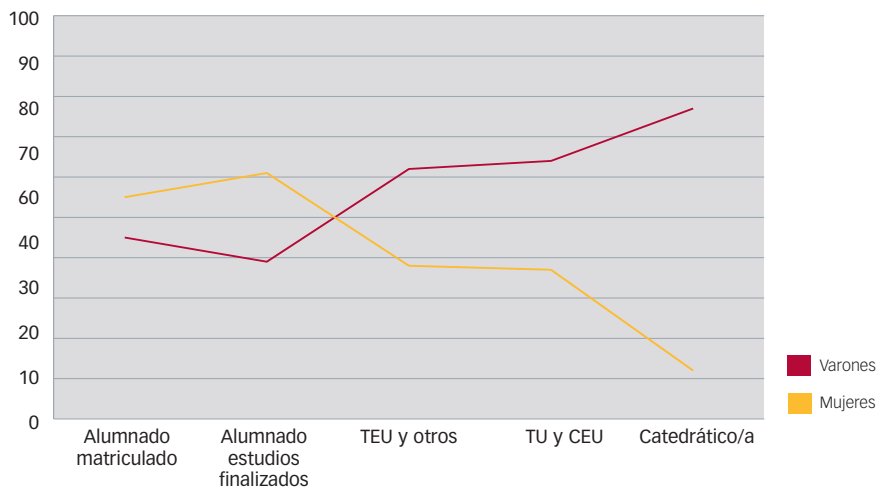
En los últimos años, distintos estudios sobre la situación de las científicas han puesto de manifiesto que las mujeres están infrarrepresentadas en casi todas las disciplinas científicas. En Europa, las mujeres científicas no alcanzarán la paridad con los hombres hasta 2050 (según G. Wallon, recogido en Lawrence, 2006). En España existen dos informes recientes en los que se analiza la situación de las científicas en nuestro país. El primero es La situación de las mujeres en el sistema educativo de ciencia y tecnología en España y su contexto internacional, editado por FECYT (2007) y el segundo Académicas en cifras editado por la Unidad de Mujer y Ciencia (UMYC) del Ministerio de Educación y Ciencia (2007). Estos informes presentan los datos más recientes sobre la distribución de mujeres y hombres en el ámbito académico y universitario. Las mujeres conforman el 53 por ciento de estudiantes en carreras universitarias y el número asciende a 59 por ciento si se consideran los licenciados. A pesar de esto sólo hay un 14 por ciento de mujeres catedráticas (figura 1).

Figura 1. Titularidades y cátedras por sexo en las universidades españolas. Tomada de UMYC (2007)



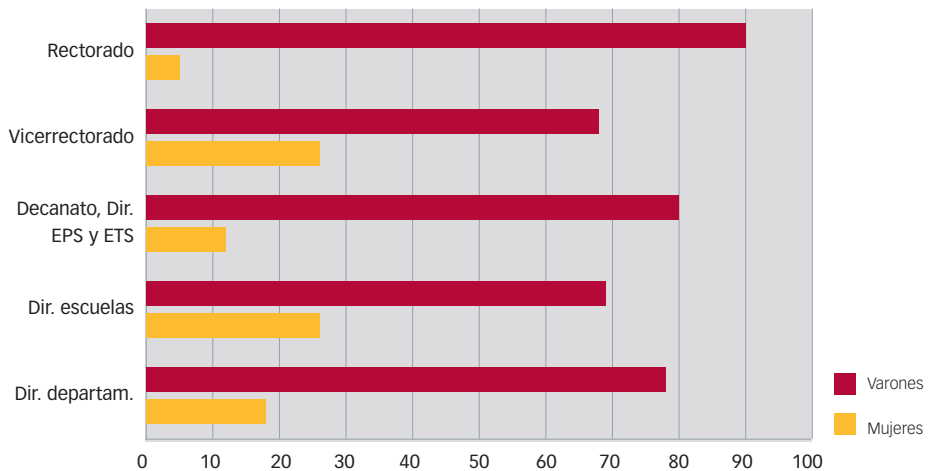
El diagrama de tijaera (figura 2) muestra cómo la proporción de mujeres es mayor que la de hombres tanto en el alumnado matriculado como en el que finaliza estudios universitarios y que la proporción se iguala en los niveles de doctorado. Sin embargo, en el profesorado estable hay más hombres que mujeres y la diferencia entre hombres y mujeres aumenta. Esto es válido tanto para las universidades como para el CSIC. Estos datos aportados por el informe de la UMYC son muy similares a los obtenidos en otros estudios.

Figura 2. Datos de alumnado y profesorado en las universidades públicas españolas en el curso 2005-2006. Tomada de UMYC (2007)



Por otra parte, si se tiene en cuenta el acceso a cargos unipersonales en las universidades públicas, las mujeres están más representadas en cargos obtenidos por designación (28,9 por ciento) que en cargos obtenidos por elección (16,4 por ciento) (figura 3).

Figura 3. Mujeres en cargos unipersonales de las universidades públicas españolas. Tomado de UMYC (2007)



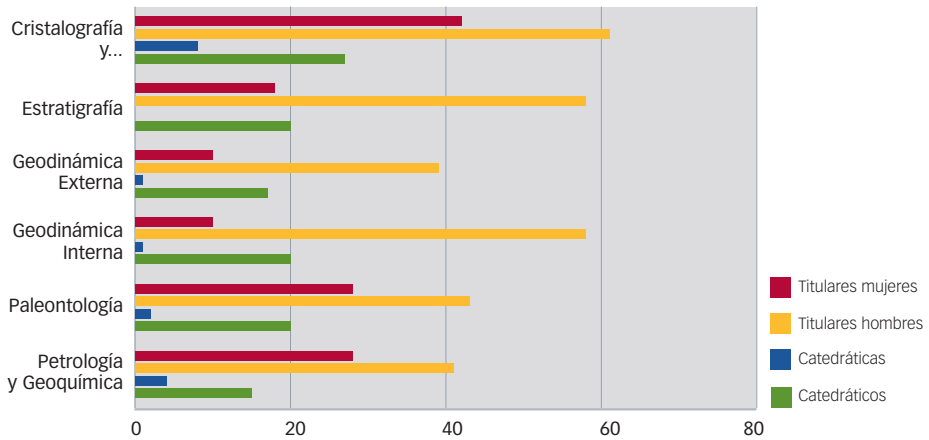
Con respecto a las mujeres geólogas en España y sus aportaciones, existen pocos datos cuantitativos y, tampoco hasta ahora, ha habido foros específicos referidos a este tema. No obstante, hay un sentimiento colectivo entre las geólogas de que su representación en las escalas académicas altas es escasa y de que sufren un alto grado de invisibilidad. Los motivos para ello pueden ser diversos y requieren la realización de estudios y análisis detallados. En este artículo no pretendemos realizar un estudio exhaustivo, sino presentar unos apuntes que nos hagan reflexionar sobre la situación de las mujeres y la geología en España y comenzar a plantearnos posibles actuaciones futuras que ayuden a mejorar su situación.

La situación de las geólogas en España: algunos datos

Las universidades y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

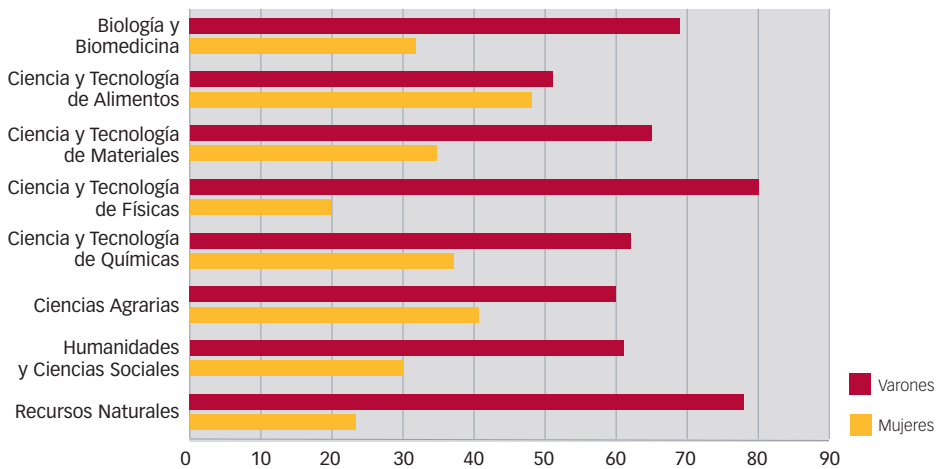
En el informe citado (UMYC/MEC, 2007), se presenta la proporción de profesores titulares frente a catedráticos en las distintas áreas de conocimiento. La figura 4 muestra la distribución en las áreas de conocimiento correspondientes a la Geología. En todas ellas la proporción de catedráticas es muy inferior a la de catedráticos e incluso en alguna de ellas, como en el área de Estratigrafía, no hay ninguna mujer catedrática.

Figura 4. Número de catedráticos/as en las distintas áreas geológicas. Datos tomados de (JMYC, 2007)



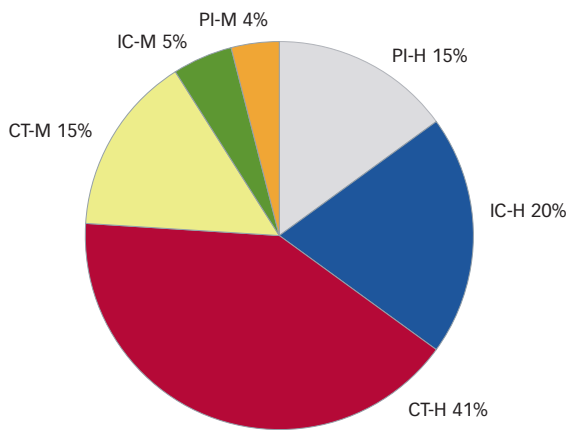
En el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), que representa uno de los organismos gubernamentales de investigación, el personal investigador de plantilla se agrupa en ocho áreas científicas, siendo el área de Recursos Naturales la que incluye una mayor proporción de investigadores del campo de las ciencias de la Tierra. Esta área presenta una proporción de mujeres menor al 25 por ciento (figura 5).

Figura 5. Porcentaje de mujeres y hombres en las escalas de investigadores de plantilla de las diferentes áreas científicas en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en el año 2007 con un total de 2.703 personas



La distribución en las tres escalas de investigadores permanentes se muestra en la figura 6. La escala inferior de científicos titulares (CT), que incluye el porcentaje más alto de mujeres, solamente representa un 15 por ciento del total de personal de plantilla en el área. En las escalas más altas de investigadores científicos (IC) y profesores de investigación (PI) la presencia de mujeres respecto al total es muy escasa con un 5 por ciento y un 4 por ciento, respectivamente.

Figura 6. Porcentaje de mujeres y hombres en las tres escalas de la plantilla de investigadores en el área de Recursos Naturales sobre un total de 403 personas en el año 2007 (PI: profesores de investigación; IC: investigadores científicos y CT: científicos titulares. H corresponde a hombres y M a mujeres)



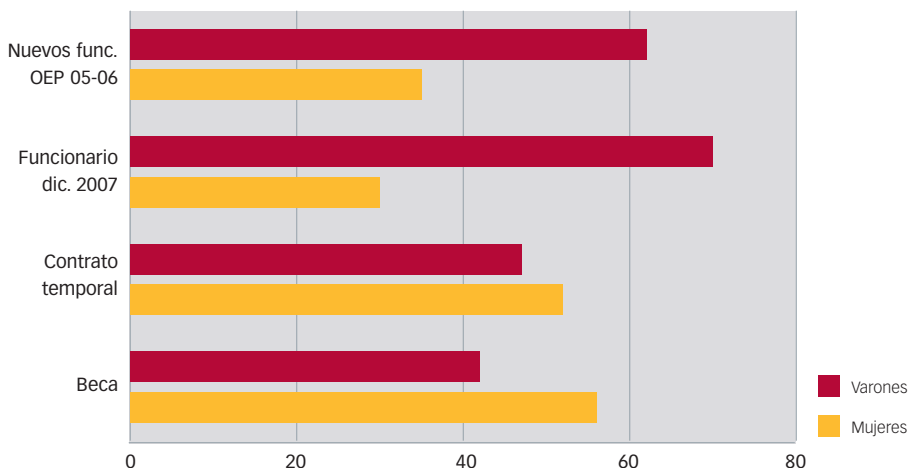
El Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

El IGME es un organismo público dedicado al estudio de la geología desde hace más de 150 años (fue fundado como la "Comisión para la Carta Geológica de Madrid y General del Reino", mediante Real Decreto de 12 de julio de 1849). Sin embargo, la participación de las geólogas y/o ingenieras u otras tituladas superiores en ésta comenzó más de un siglo después.

En el año 1996 comienza a trabajar en el IGME por primera vez una titulada superior, Casilda Ruiz, geóloga, y hasta diez años más tarde no lo hizo la segunda. A partir de aquí, en un lento goteo al principio y más rápidamente desde la década de los noventa, fueron incorporándose mujeres a los puestos científico-técnicos del IGME. En la actualidad el 30 por ciento de los puestos de funcionario de titulado superior del IGME (incluye tanto los puestos de administración como los científico-técnicos, abarcando un amplio rango de titulaciones) está ocupado por mujeres, siendo la titulación dominante la licenciatura en Ciencias Geológicas. En los puestos temporales y las becas las

mujeres están claramente mejor representadas, alcanzando porcentajes superiores al 50 por ciento (figura 7).

Figura 7. Distribución por sexos del total de titulados superiores en el IGME (datos de diciembre de 2007) y resultados de la oferta de empleo público de 2005 y 2006



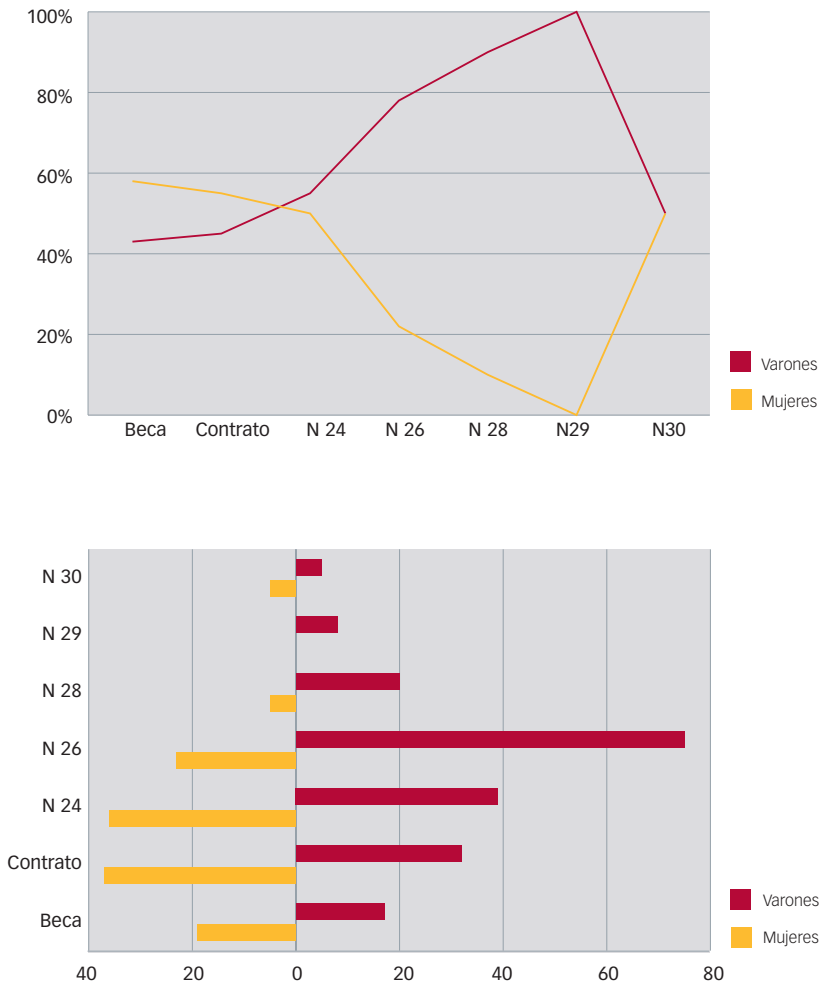
Si comparamos estos datos con los resultados de las ofertas de empleo público de 2005 y 2006 (figura 7), vemos que el 37-38 por ciento de los nuevos puestos tanto de técnico superior especialista (N24) como de investigador titular (N26) son ocupados por mujeres, lo que nos indica que la plantilla fija se está “feminizando” aunque no al ritmo que parecen indicar las becas y contratos temporales.

La participación de las mujeres en puestos de responsabilidad (Dirección General y niveles 29 y 30), a los que se accede por libre designación, es muy limitada (figura 8). El puesto de máxima responsabilidad de la institución nunca ha sido detentado por una mujer. Respecto a los niveles 30, en marzo de 2007 una mujer ocupó por primera vez una dirección técnica (Dirección de Geología y Geofísica), hecho que supuso conseguir la paridad en este nivel ya que la secretaria general también la detenta una mujer (la segunda en la historia del IGME). Nunca un puesto de N29 ha sido ocupado por una mujer.

En cuanto a los puestos ocupados por promoción profesional, en 2002 una mujer ocupó por primera vez un puesto técnico de N28 y la siguiente lo hizo en 2007 (en los puestos de administración ha habido además dos jefas de personal N28). Los puestos de N26 están ocupados en un 23 por ciento por mujeres; el acceso a estos puestos puede ser o bien directo como investigador titular (doctores que acceden directamente al puesto

con este nivel) o bien por promoción desde puestos de técnico superior N24. Los puestos de N24 (46 por ciento mujeres) son ocupados por técnicos superiores especialistas, titulados superiores que acceden directamente con este nivel. En resumen, en la figura 8 puede verse cómo el típico diagrama en tijera que suele producirse en los centros de investigación por la pérdida progresiva del peso de las mujeres a lo largo de la carrera profesional, en el IGME queda transformado en un diagrama "en pez" debido a la existencia actual de paridad en los niveles 30.

Figura 8. Distribución por sexos del total de titulados superiores en el IGME según tipo de relación laboral y categorías, en porcentaje (a) y en número absoluto (b) (datos de diciembre de 2007)



Por otra parte, de la revisión del catálogo de proyectos del IGME del 2007 se extrae que, aunque el 30 por ciento de los puestos de titulados lo ocupan mujeres, éstas sólo son el 20 por ciento de los responsables de proyectos en ese momento, y dirigen únicamente el 17 por ciento del total de proyectos (29 de 163). Remontándonos más atrás, si analizamos un proyecto emblemático del IGME como ha sido el MAGNA, desarrollado entre los años 1970-2000, encontramos que sólo una de las 32 personas que fueron responsables de hojas MAGNA era mujer, y ésta fue responsable de menos del uno por ciento de las hojas (9 hojas frente a un total de 1124) (datos elaborados a partir de la base de datos MAGNA).

La Enseñanza Secundaria

La enseñanza de la Geología en los niveles no universitarios, regulada por la normativa que desarrolla la Ley Orgánica de Educación (LOE), está siendo infravalorada. En este sentido, la Geología ha sido apartada en algunos casos y relegada con respecto a otras ciencias en otros, privando a nuestros estudiantes de la visión de una parte importante de su realidad. Un análisis cuantitativo realizado sobre los principales textos de Ciencias de la Naturaleza en cuarto curso de la Educación Secundaria Obligatoria (ESO) revela una discreta presencia de temas de naturaleza geológica. El análisis se ha centrado en el cuarto curso de la Enseñanza Secundaria Obligatoria (ESO) por ser éste el primero en el que se imparte una asignatura (Biología y Geología) de carácter optativo, que incluye contenidos específicos. Los textos existentes de esta asignatura mantienen una relación aproximada de un 30 a 35 por ciento de contenidos geológicos frente a un 65 a 70 por ciento de contenidos biológicos. Si bien esto no tiene ninguna connotación con respecto al género, es evidente que puede condicionar que menos alumnos tengan interés por estudiar Geología o Ingeniería Geológica por un lado y, por otro, está condicionando la presencia de geólogos/as en la enseñanza media a favor de los biólogos/as.

La distribución por sexos en la Enseñanza Secundaria Obligatoria y Bachillerato es muy equilibrada. En base a los datos de la AEPECT (Asociación para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra) sobre un total de 917 profesores en activo, 484 son geólogas. Este dato avala el hecho de que hay más geólogas que aprueban las oposiciones en relación a los geólogos.

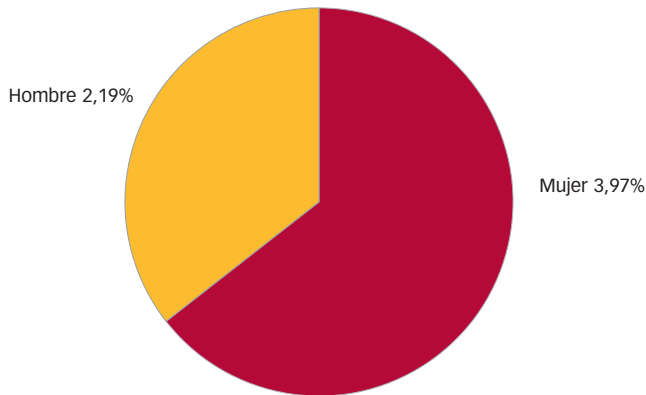
Geólogas en el ICOG

Desde el área de Desarrollo Profesional del ICOG se ha trabajado por la no discriminación de género, y se ha puesto un gran empeño en apoyar todas aquellas iniciativas de colegiadas con el fin de conseguir la equiparación en posibilidades de promoción y salarios.

No obstante, consideramos que aún tenemos un largo camino en el que debemos seguir avanzando en el progreso de nuestros objetivos, ya que ni este colectivo ni esta sociedad pueden permitirse el lujo de no utilizar o infrautilizar, a más de la mitad del potencial de recursos humanos, por razones de género.

Aunque hemos avanzado en la tasa de paro dentro del colectivo de colegiados, pasando desde un 10,5 por ciento de tasa de paro en el 2004 a un 2,75 por ciento en el 2007, seguimos manteniendo una diferencia mayor del 50 por ciento más de paro en mujeres frente a hombres. Esta realidad, lamentablemente, es la misma diferencia que se mantiene a nivel de Estado (figura 9).

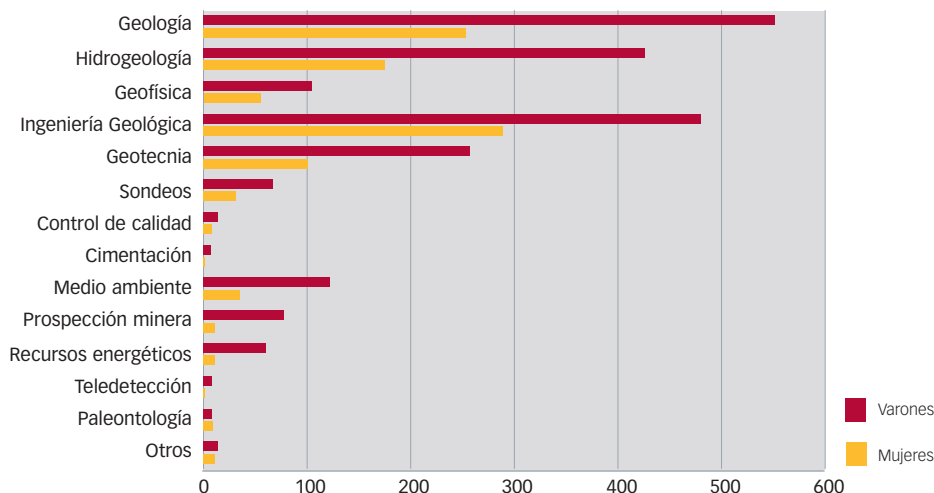
Figura 9. Tasas de paro de hombre y mujer según los datos de colegiados del ICOG para el año 2007



Hay que añadir que el número absoluto de mujeres colegiadas vs hombres colegiados es también mayor y cercano al 50 por ciento a favor de los colegiados. Esto puede explicarse principalmente por dos razones:

- ▶ Razones históricas: hasta los años setenta las mujeres españolas han tenido menores posibilidades para acceder a los estudios universitarios. A pesar de que su incorporación ha ido aumentando rápidamente y ya en los últimos cuatro años el número de hombres y mujeres matriculados o que finalizan los estudios es prácticamente igual, esto aún no se ha visto reflejado en el número de colegiados.
- ▶ Razones sociales: los colegiados son principalmente licenciadas/os con ocupación profesional cualificada, es decir, el número de colegiados/as con subempleo es bajo. Pensamos que las mujeres ocupan más puestos precarios y temporales y por ello no se colegian.

Figura 10. Distribución por especialidad profesional de colegiados y colegiadas



La contribución de las geólogas al conocimiento de la geología de España

La Sociedad Geológica de Londres ha publicado recientemente un volumen especial sobre el papel que algunas mujeres han tenido en el desarrollo de la geología, aunque enfocado principalmente a las mujeres del ámbito anglosajón (Burek y Higgs, 2007). Martina Kölbl-Ebert (2001) hace una comparación de las poblaciones de geólogas activas a lo largo del tiempo en Alemania y en el Reino Unido como si se tratase de dos especies del genus "woman geologist" y ve cómo se correlacionan las épocas de boom con las dos guerras mundiales y las extinciones o abandonos al finalizar éstas, cuando deben dejar el sitio a los hombres que vuelven de la guerra.

En España, por el momento no disponemos de esos trabajos. Podemos destacar sin embargo que el primer trabajo publicado por una mujer en el Boletín Geológico y Minero (revista sucesora del Boletín de la Comisión para el Mapa Geológico, editado desde 1874) fue la tesis doctoral de María Domínguez Astudillo (1943).

No obstante, como posible indicador del papel que las geólogas desempeñan actualmente en el conocimiento de la geología de España, hemos analizado la participación femenina en la lista de autores de dos monografías recientemente editadas, una por la Sociedad Geológica de Londres (West y Gibbons, 2003) y otra más reciente por la Sociedad Geológica de España (Vera, 2004). El resultado de analizar la participación de las

mujeres en dichas publicaciones es casi dramático. En la monografía editada en España, sólo el 20 por ciento de los autores son mujeres y sólo hay una mujer entre los 14 miembros del consejo de redacción.

En la conferencia sobre la “Mujer y Ciencia” organizada conjuntamente por el Parlamento y la Comisión Europea en Bruselas, en abril de 1998, se hizo una declaración formal sobre la “necesidad de intensificar los esfuerzos para aumentar la presencia de las mujeres en la investigación en Europa”. Eso se tradujo, a efectos prácticos, en la incorporación —por primera vez en la historia de la política de investigación de la Unión Europea— de una línea de trabajo en el subprograma de investigación socioeconómica del V Programa Marco de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (1999-2002) y, además, en una comunicación y en un plan de acción de la Comisión Europea de febrero de 1999, que fueron inmediatamente apoyados por sendas resoluciones del Parlamento Europeo y de los Estados miembros.

Desde entonces se están produciendo avances paulatinos. En España se está avanzando más en el marco legislativo que en el de la igualdad —cuando menos aritmética— de la mujer en los órganos de planificación, organización, decisión, liderazgo y asesoramiento científico.

En el año 2004, en la Real Academia de Jurisprudencia y Legislación (40 miembros) y en la Real Academia de Ciencias Morales y Políticas (34) no había ningún miembro femenino. En 2007 sólo el 10 por ciento de las/os académicas/os son mujeres: 29 de un total de 474 miembros (INE e Instituto de la Mujer, 2008).

A pesar de que a finales del siglo XIX y principios del XX se abrieron las posibilidades de las mujeres para acceder a la educación superior y, por tanto, de conseguir trabajo en el campo científico, sus oportunidades de empleo y prestigio nunca han sido iguales frente a las de los hombres, pues los estereotipos de género presentes en la ciencia y en la sociedad en general, se lo impiden (Harding, 1995).

Durante el siglo X, las mujeres han jugado un papel importante en el mundo de la investigación científica y tecnológica y en los demás campos de la vida social.

No obstante, la Declaración de Atenas de 1992 ha mostrado un claro deseo de un nuevo contrato social que establezca una democracia paritaria.

Larocque (1995) afirma que la experiencia educativa en geociencias hace que las mujeres cambien sus expectativas, ya que hay una proporción mayor de mujeres que no cursan el grado superior o que abandonan tras haberlo iniciado, a causa de los obstáculos

que encuentran durante sus carreras académicas y profesionales, que establecen única y exclusivamente modelos masculinos. Además, esto influye en la elección de unas áreas u otras dentro de la misma disciplina. Las mujeres escogen áreas de trabajo no tradicionales de la geología, esperando encontrar menos impedimentos.

Las geólogas españolas de este siglo (1950-2007). Resultados preliminares de una encuesta con perspectiva de género

Los datos que aquí se presentan son los resultados de una encuesta de 26 preguntas diseñada por María Antonia Díez-Balda y distribuida a través de la SGE y el ICOG. La encuesta plantea preguntas relacionadas con la experiencia de mujeres que trabajan en un medio profesional muy masculino, en el que frecuentemente se realizan labores en el campo, en canteras, obras, etc., y que implica viajar bastante. También nos interesó la percepción personal de cada una en cuanto a actitudes o al trato diferencial en razón del sexo; el reparto de las tareas domésticas con la pareja; la conciliación familiar y laboral, y por último nos interesó conocer el conocimiento del feminismo y/o de la lucha feminista. Se han recibido 241 respuestas y la base de datos la ha elaborado el ICOG. Los resultados más relevantes son los siguientes.

- ▶ Más del 75 por ciento se consideran geólogas vocacionales. El 90 por ciento de las profesoras titulares de universidad y el 75 por ciento de las contratadas en empresas se consideran vocacionales.
- ▶ El tiempo dedicado a las labores domésticas varía mucho. Las titulares de universidad, con edades de 40 a 65 años, afirman que dedican más tiempo que su pareja en un 80 por ciento; ninguna dedica menos tiempo y un 20 por ciento dedica el mismo. Entre las profesoras ayudantes o becarias predoctorales, menores de 32 años, sólo el 36 por ciento dedica más tiempo que su pareja pero el 63 por ciento afirma que dedica el mismo tiempo. Las geólogas contratadas en empresas privadas, con edades de 25 a 40 años en su mayoría, en un 55,5 por ciento dedica más tiempo, un 14,7 por ciento dedica menos tiempo y el 29,5 por ciento dedica el mismo tiempo. Parece pues que el reparto de las tareas se va haciendo más igualitario entre las más jóvenes.
- ▶ A más del 64 por ciento no les interesa el poder.
- ▶ Muchas titulares de universidad (54 por ciento) piensan que sus colegas se han apropiado alguna vez de sus ideas y no las han citado.
- ▶ Para la mayoría es muy importante su trabajo: por ej., de las titulares de universidad sólo un 9 por ciento dejaría incondicionalmente su trabajo para acompañar a su pareja al extranjero para que éste se promocionara, un 16 por ciento no lo haría nunca y el 64 por ciento sólo si ella también pudiera beneficiarse en su carrera.

- ▶ Más de un 40 por ciento se sienten más vulnerables en el campo por el hecho de ser mujeres. Una señala: “claro, para eso está el martillo”.
- ▶ Para el 95 por ciento de las encuestadas en 2007 aún no se ha alcanzado la igualdad. Para más del 94 por ciento es necesaria todavía en España la lucha de las mujeres por la igualdad.
- ▶ Más de un 45 por ciento cree necesarias medidas de acción positiva para facilitar el acceso de las mujeres a puestos de poder. Sin embargo, muchas las consideran contraproducentes o consideran que es un favoritismo injusto. Esta pregunta suscita muchos comentarios como: “el sistema de cuotas es humillante”. Alguna opina que nos autoexcluimos porque no queremos horarios tan exigentes. Otra dice: “no soporto oír que a fulanita la han elegido por la cuota”.
- ▶ Sólo unas pocas (menos de 5) han visto que ser mujer les resultó ventajoso para formar parte de algún comité porque necesitaban cubrir el cupo de mujeres.
- ▶ En general, la mayoría considera que ser mujer es una desventaja. Especialmente en relación con la maternidad, pues para muchas éste es el principal problema y afirman que la conciliación laboral y familiar es por ahora una utopía. La carga del cuidado de los hijos pequeños sigue siendo, pues, fundamentalmente su responsabilidad y les hace muy difícil viajar o asistir a congresos que impliquen pasar la noche fuera de casa. Algunas denuncian despidos por embarazo, miedo de comunicarle al jefe que se está embarazada, freno en su promoción mientras los hijos son pequeños. Además no existen guarderías en los campus o en los centros de trabajo, a pesar de haberlas solicitado desde los años setenta.
- ▶ Aún muchas contratadas afirman que cobran menos por el mismo trabajo que sus compañeros y que a los hombres les cuesta mucho recibir órdenes de una mujer. Otras se sienten “ninguneadas” y los ingenieros se dirigen al último becario hombre aunque ellas sean las jefas del proyecto. Se sienten invisibles y cuestionadas. Tienen que demostrar continuamente su capacidad.
- ▶ El conocimiento del feminismo es muy diferente según los grupos de edad. Las más jóvenes no se consideran feministas y algunas dudan del significado de este término.

Podemos apuntar las siguientes reflexiones:

- ▶ Estudiar y practicar la geología en la España de la segunda mitad del siglo XX y primera década del XXI todavía sigue siendo más difícil para las mujeres.
- ▶ En primer lugar algunos padres o madres no deseaban estos estudios para nosotras porque los consideraban muy masculinos.
- ▶ El estímulo durante los estudios fue diferente según el género ya que todavía existían muy pocos modelos de profesoras geólogas con autoridad científica reconocida en la que reflejarnos; tampoco los profesores nos trataban igual y algunos nos reconocían más por nuestro atractivo físico que por nuestra cabeza.

- ▶ Ningún profesor nos dijo nunca que éramos igualmente válidas para esta profesión y no nos citaron a las científicas relevantes en esta carrera (como Inge Lehmann, sismóloga que descubrió el núcleo interno terrestre) o a las pioneras Elles y Wood, especialistas en graptolites. Partiendo de una desigual situación hubieran sido necesarias estas medidas de acción positiva para estimularnos.
- ▶ Encontrar el primer empleo ha sido más difícil para nosotras, especialmente si se trataba de trabajos de campo o de dirección de equipos de obra o similar.

La mujer en la geología española del siglo XXI

Los datos estadísticos informan de la siguiente situación de partida:

- ▶ No hay diferencia de producción, en igualdad de condiciones, entre mujeres y hombres del mismo nivel profesional, lo que deja como injustificado el bajo desarrollo profesional en sistemas de meritocracia.
- ▶ La lentitud en la promoción profesional de la mujer no se corresponde con la velocidad y el valor de las cifras de cualificación profesional para el mismo puesto (licenciadas, doctores, magíster, etc.).
- ▶ La afectividad, en forma de familia estable, favorece la producción y la carrera de los hombres, mientras parece retrasar y dificultar la de las mujeres.

Sin descartar los determinantes culturales ancestrales, que no queremos perpetuar desde posturas conformistas, sí queremos desechar algunas afirmaciones populares por no tener base que las avale:

- ▶ Casi la totalidad de los varones y muchas mujeres piensan realmente que sus organismos e instituciones son ajenos a la discriminación sexual.
Esta afirmación se cae por el propio peso de los datos estadísticos desglosados por género que acabamos de presentar.
- ▶ Las desigualdades adjudicadas están muy arraigadas y son difíciles y lentas de cambiar y, en último término, fuera de nuestras competencias.
Dentro de cada dependencia hay mecanismos que permiten cambiar esta realidad, por esta razón al final de este capítulo hacemos algunas sugerencias.
- ▶ La desigualdad profesional se debe a elecciones personales de la mujer, que optan por renunciar a ocupar puestos de mayor responsabilidad o que eligen voluntariamente no competir para mejorar su clasificación profesional.

Para que se pueda optar libremente sería conveniente suavizar los obstáculos: familiares, personales u organizativos que coaccionan las elecciones profesionales de las mujeres.

- ▶ “La situación actual es fruto de la tardía incorporación de las mujeres al mundo laboral y por tanto, el tiempo se encargará de equilibrarlo.” Creencia sin fundamento ya que, como hemos visto, ya empezamos a observar retrocesos en posiciones que parecían consolidadas.
- ▶ “Las mujeres con mejores niveles de formación tienen más facilidades profesionales.” Los datos establecen que las mujeres son, cualitativamente, una minoría y están más cerca de su sexo que de su posición social o categoría académica.
- ▶ “Hay determinadas áreas de conocimiento que no les gustan a las mujeres.” Haciendo de la necesidad virtud, las mujeres terminan optando por aquellas áreas o departamentos a que se las “adjudica” como su espacio natural porque encuentran menos obstáculos en su carrera profesional.

La realidad en la que nos encontramos inmersos es un proceso de transición, en donde los roles de hombres y mujeres están cambiando. Desde una sociedad con roles definidos y separados avanzamos hacia una sociedad en la que los roles sean decisiones individuales de cada persona, de cada pareja o de cada familia, atendiendo únicamente a circunstancias particulares, no condicionadas por prejuicios.

En este momento de transición, la peor parte le ha sido asignada a la mujer, ya que ha sido el motor de este cambio de roles dentro de la sociedad y se ha convertido en el motor de esta revolución del siglo XXI.

La mujer ha abandonado una parte de responsabilidad familiar y, por su parte, el hombre tendrá que ir adoptando un papel más relevante en la vida familiar.

El grado de equilibrio profesión/familia ha pasado de ser socialmente definido a ser una decisión personal. Para permitir esta flexibilidad, la sociedad y las empresas están cambiando, aunque lentamente; estamos buscando la conciliación.

Asimismo, el Informe GEM apunta hacia un cambio en el tipo de participación de las mujeres en el mundo empresarial hacia áreas “tradicionalmente reservadas para los hombres”, por ejemplo, destacar la labor de nuestras emprendedoras geólogas que actualmente desarrollan su labor profesional en su propia empresa de ingeniería geológica.

El Informe GEM también destaca que desde hace unos años se encuentra estancado el crecimiento de la actividad emprendedora de la mujer, quizás por culpa de los obstáculos sociales e institucionales que no permiten esa conciliación entre vida familiar y desarrollo profesional.

Actuaciones para favorecer la igualdad en la ciencia

- ▶ Ley contra la Violencia de Género (2004).
- ▶ 54 medidas (2005).
- ▶ Acción Positiva en el Plan Nacional (2005).
- ▶ Ley de Igualdad (2007).
- ▶ Reforma de la LOU (2007).

L.O. contra la Violencia de Género (28/12/2004)

“Las Universidades incluirán y fomentarán en todos los ámbitos académicos la formación, docencia, investigación, en igualdad de género y no discriminación de forma transversal” (Tit. 11, cap. 1, art. 7).

BOE nº 57 del 8/3/2005

- ▶ Medida 4.1: Se acuerda crear una unidad específica de “Mujer y Ciencia” para abordar la situación de las mujeres en las instituciones investigadoras y mejorar su presencia en ellas.
- ▶ Medida 4.2: Se acuerda incluir, como criterio adicional de valoración en la concesión de ayudas a proyectos de investigación, la participación de mujeres en los equipos de trabajo.

BOE nº 292 del 9/12/ 2005 (pág. 40489)

Exclusivamente entre los proyectos propuestos para financiar por la comisión de selección se valorará la participación de miembros femeninos en el equipo de investigación (como investigadoras principales o como participantes en el equipo). Si el cociente de género mejora la media de su Programa Nacional, área o subprograma, este criterio mejorará la valoración de la Comisión de selección con cinco puntos.

Reforma LOU. Preámbulo

“[...] establecimiento de sistemas que permitan alcanzar la paridad en los órganos de representación y una mayor participación de la mujer en los grupos de investigación”.

“[...] Los poderes públicos deben remover los obstáculos que impiden a las mujeres alcanzar una presencia en los órganos de gobierno de las universidades y en el nivel más elevado de la función pública docente e investigadora acorde con el porcentaje que representan entre los licenciados universitarios”.

Reforma LOU. Órganos de gobierno: representación de las universidades públicas

Los estatutos establecerán las normas electorales aplicables, las cuales deberán propiciar en los órganos la presencia colegiada equilibrada entre mujeres y hombres (art. 13).

Reforma LOU. Investigación

“La universidad desarrollará una investigación de calidad así como garantizará el fomento y la consecución de la igualdad.”

“Se promoverá que los equipos de investigación desarrollen su carrera profesional fomentando una presencia equilibrada entre mujeres y hombres en todos sus ámbitos.”

Reforma LOU. Becas

“En todos los casos, se prestará especial atención a las personas con cargas familiares, víctimas de la violencia de género y personas con discapacidad, garantizando así su acceso y permanencia en los estudios universitarios.”

Reforma LOU. Becas/contratos

“Las situaciones de incapacidad temporal, maternidad y adopción o acogimiento durante el periodo de duración del contrato, interrumpirán su cómputo” (disposición final tercera).

Reforma LOU. Acreditación

Reglamentariamente, se establecerá la composición de las comisiones... En todo caso, deberá ajustarse a los principios de imparcialidad y profesionalidad de sus miembros, procurando una composición equilibrada entre mujeres y hombres, salvo que no sea posible por razones fundadas y objetivas, debidamente motivadas.

Las Unidades de Igualdad

Las universidades contarán entre sus estructuras de organización con Unidades de Igualdad para el desarrollo de las funciones relacionadas con el principio de igualdad entre mujeres y hombres (disposición adicional duodécima).

¿Cómo cambiar el modelo organizativo para conciliar la vida familiar y laboral?

A pesar de que casi el 60 por ciento de las licenciaturas los adquieren las mujeres, la representación femenina en los puestos de responsabilidad y decisión tanto en el mundo universitario como en el de la investigación dista aún mucho de ser equilibrada respecto a la de los hombres. El hecho real es que las mujeres sufren una persistente discriminación.

Así como el ámbito universitario continúa dominado ligeramente por los hombres, en la enseñanza media hay más geólogas que geólogos. En el año 1984, el número de mujeres en las universidades españolas era del 49,4 por ciento, mientras que el número de catedráticas era de 7,9 por ciento. Más de 20 años después hemos visto que las mujeres que se matriculan en las universidades españolas superan a los hombres, mientras que la proporción de catedráticas es de un 13,7 por ciento. Muchas de las mujeres que terminan su carrera no continúan a causa de obstáculos que encuentran en su camino, tales como familiares o económicos.

Es evidente que se impone un cambio que abogue por favorecer la vida familiar y la laboral. No hay una fórmula ideal pero, por ejemplo, en Canadá existe lo que denominan "parada biológica", que consiste en no contar el tiempo que una mujer dedica a la maternidad y a criar a sus hijos a nivel curricular.

En algunos centros de trabajo crean guarderías para que los niños pequeños estén cerca del padre o de la madre.

Es evidente que el hecho de alargar los permisos de maternidad no es suficiente, ya que a nivel universitario la carrera científica queda relegada en el tiempo que la mujer tiene hijos pequeños. Carmina Virgili sugería en una entrevista que después de la baja maternal se liberase a las profesoras de tareas docentes y administrativas para dedicar tiempo a actualizar su currículum (modelo sueco).

La enseñanza en general y la de la geología en particular es cosa de todos, lo que hace que la complementariedad de unos con otros, acabe enriqueciendo.

Ya va siendo hora de que la sociedad cambie y se adapte de verdad a la situación y, sobre todo, que la maternidad y la vida familiar no supongan una carga para las mujeres, ya que el problema no radica ni en la falta de preparación ni en la falta de ambición.

Recomendaciones

Con el fin de reducir las diferencias de género que las estadísticas resaltan, sugerimos algunas medidas que fortalezcan la unidad social entre hombres y mujeres:

- ▶ Impulsar la formación no sexista en todos los niveles educativos y sensibilizar a la sociedad en apoyo de la igualdad de género.
- ▶ Divulgar las políticas europeas que promuevan la igualdad de oportunidades de ambos sexos.
- ▶ Promover y difundir los criterios de elaboración de indicadores desglosados por sexo en las administraciones y organismos públicos y privados y los datos estadísticos que de ellos se deriven.
- ▶ Garantizar la presencia de al menos el 40 por ciento de mujeres en los comités de evaluación y órganos de selección y desarrollo profesional.
- ▶ Garantizar que en determinadas áreas, departamentos o centros de trabajo en donde la mujer esté claramente en inferioridad numérica frente a los hombres, se promuevan actuaciones correctivas hasta alcanzar la equidad.
- ▶ Crear unidades dentro de los distintos ministerios que velen por la igualdad de oportunidades entre hombres y mujeres.
- ▶ Reforzar las medidas tendentes a la conciliación entre la vida profesional, privada y familiar.

Desde finales del siglo XVIII, deshacer las tradicionales barreras entre lo público —terreno masculino— y lo privado —terreno femenino—, ha sido una ardua tarea llena de obstáculos para la mujer, ya que el acceso al espacio público ha sido considerado como un peligro para el orden social establecido y para el reparto de roles por género.

Fray Luis de León (1527-1591), en su obra *la Perfecta Casada*, traza el perfil ideal de la mujer: recatada, obediente, sacrificada, defensora del propio honor y educadora de los hijos. Tres son sus funciones básicas: ser buena esposa, ordenar el trabajo doméstico y perpetuar la especie humana.

En 1946, los fundadores de las Naciones Unidas consagran la primera Carta de igualdad de derechos de mujeres y hombres. En 1995 durante la Conferencia y Plataforma de Acción de Beijing se acordó que la igualdad de género es fundamental para el desarrollo y la paz de todas las naciones. Confiábamos que en la Declaración del Milenio que tendría lugar en septiembre del 2006, se recordara que la promoción de la igualdad de género es responsabilidad de todos: hombres y mujeres.

Comentarios finales y perspectivas

A pesar de los cambios legislativos que hemos señalado anteriormente y de las medidas tendentes a mejorar la participación y la promoción de las mujeres en el mundo académico y profesional, los datos disponibles, algunos de ellos presentados en este trabajo, ponen en evidencia una infrarrepresentación de las mujeres en el ámbito académico de la geología en España.

La solución a estos problemas pasa necesariamente por un sistema transparente de evaluación de méritos y de selección de los miembros de las comisiones y en el que el modelo tradicionalmente endogámico, dé paso a un sistema en el que el criterio de valoración sean los méritos. Es decir, un sistema apartado del "coleguismo" o la endogamia que muchas veces funciona (Vázquez-Cupeiro y Elston, 2006), y que en el caso de la geología, suele dejar fácilmente excluidas a las mujeres, pues son menos y no siempre entran en las "redes masculinas". El ejemplo de los libros de geología de España, muestra que este hecho ocurre y que debe ser evitado, incluso en aspectos que no son tan trascendentes para las carreras profesionales de las mujeres. El dejar apartadas a las mujeres o limitar tanto su participación, constituye una pérdida importante de recursos humanos pues supone no incluir en el mundo productivo a muchas mujeres cualificadas, que podrían contribuir al enriquecimiento de la geología y a alcanzar una mayor productividad en este campo.

Por lo tanto, queda mucho aún por hacer para que las propias mujeres geólogas sean conscientes de las trabas que aún sufrimos en el mundo patriarcal (tanto en la universidad como en las empresas) para alcanzar los puestos de decisión, de poder y responsabilidad; para ganar los mismos salarios que ellos; para que reconozcan por igual nuestros méritos y, en definitiva, para poder alcanzar la paridad que en justicia merecemos... y que esto no ocurra cuando ya tengamos 90 años. Necesitamos pues empuñar nuestros martillos y romper el techo de cristal.

Agradecimientos

M. A. Díez-Balda agradece a todas las personas que han respondido con interés a su encuesta. A todas las geólogas.

Referencias bibliográficas

Alcalá Cortijo, P.; Bordons, M.; García de Cortazar, M. L.; Griñón, M.; Guil, A.; Muñoz, A.; Pérez Sedeño, E. y Santesmases, M. J. (2005). Mujer y ciencia. La situación de las mujeres investigadoras en el sistema español de ciencia y tecnología. FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología).

Burek, C. V. y Higgs, B. (eds.) (2007). The role of women in the History of Geology. GSL Special Publication 281.

Comisión Europea (2000). Promover la excelencia mediante la integración de la igualdad entre géneros.

Comisión Europea (2003). Women in Industrial Research.

CSIC (2006). www.csic.es/wi/mujer_ciencia/archivos_descargar/informe_mujeres_2006.pdf

Domínguez Astudillo, M. (1943). Influencia del yeso en la flotación de los sulfuros de plomo y de zinc (eliminación de dicha influencia). Bol. Geol. Min. 56: 539.

FECYT (2007). <http://www.fecyt.es/fecyt/docs/tmp/1649797961.pdf>

Gibbons, W. y Moreno, T. (eds.) (2002). The Geology of Spain. Geological Society, Londres.

Instituto Nacional de Estadística (INE) e Instituto de la Mujer (2005). Mujeres y Hombres en España.

Kölbl-Ebert, M. (2001). On the origin of women geologist by means of social selection: German and British comparison. Episodes 24(3): 182-193.

Lawrence, P. A. (2006). Men, Women and Ghosts in Science. PLoS Biol 4(1): 19.

MUFACE N° 192. La situación de la mujer en la ciencia, que investiguen ellas.

Observatori de bioètica i pret. Parc Científic de Barcelona (2004). Documento sobre Mujeres y Ciencia.

Rossiter, M. (1995). Women Scientists in America.

Subdirección General de Recursos Humanos (2004). Mujeres investigadoras del CSIC. Informe.

UMYC (2007). www.mec.es/ciencia/umyc/files/2007-academicas-en-cifras.pdf

Uskola Ibarluzea, A.; Fernández Alonso, M^a D. y Nuño Angós, T. (2005). VII Congreso. Enseñanza de las Ciencias. ¿Tienen marca de género los estudios de Geología?

Vázquez-Cupeiro S. y Elstonn, M. A. (2006). Gender and academic career trajectories in Spain. *Employee Relations*, 28(6): 588-603. Doi. 10.1108/01425450610704515.

Vera, J. A. (ed.) (2004). Geología de España. SGE-IGME.

El geólogo gemólogo

Cristina Sapalski

Vicepresidenta segunda del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG). Gemóloga

Antecedentes

Los primeros estudios y conocimientos sobre los minerales y las piedras preciosas, pertenecían a lo que conocemos como ciencias ocultas. Antiguamente, estas ciencias se basaban esencialmente en la astrología y la alquimia.

En el siglo I d.C. Plinio el Viejo redactó la enciclopedia más antigua de la historia, que contenía todos los saberes de su tiempo abarcando la física, la astronomía, geografía, botánica, zoología y medicina. Este sabio romano, nacido en el año 23 de nuestra era y muerto mientras estudiaba la erupción del Vesubio en el año 79, dedicó un volumen de su Historia Natural a las piedras preciosas.

Desde la aparición de la escritura quedaron reflejadas en distintas obras muchas de las ideas de las distintas civilizaciones sobre el mundo mineral, sobre las propiedades de los minerales, sobre los metales que se obtenían de ellos, y especialmente sobre las propiedades, mágicas o medicinales, de las que eran consideradas en cada momento como piedras preciosas.

Muchos de estos conocimientos empezaron a conocerse públicamente gracias a personajes como Alfonso X, rey de Castilla —conocido como “El Sabio”—, que vivió en la segunda mitad del siglo XIII. Su principal mérito fue buscar y hallar los tratados escritos en árabe y otros idiomas, inasequibles para quienes únicamente conocían el castellano, y traducirlos. Cuando Alfonso era todavía infante, en 1243, mandó traducir del árabe un



Figura 1. Corona de lámina repujada con engastes. Tesoro de Guarrazar. Museo Arqueológico Nacional, Madrid.

tratado sobre las propiedades de las piedras, *Lapidario* de Alfonso X, que se atribuye en el prólogo de la versión castellana a Abolays, sabio musulmán de origen caldeo, del que nada se conoce, aunque se ha intentado identificar con Abul Abbas, naturalista de al-Andalus, muerto en 1237.

Otra obra interesante, ya más tardía, es el *Libro de propiedades rerum*, la traducción hecha por Fray Vicente de Burgos de la obra homónima de Bartholomaeus Anglicus (Bartolomé Glanvilla), escrita originalmente alrededor de 1240, y muy popular a lo largo de toda la Edad Media; trata en su libro XVI íntegramente “de las piedras y los metales”.

Con la llegada del Renacimiento y la difusión de la imprenta, las obras escritas dejan de ser patrimonio exclusivo de monasterios y bibliotecas. Los *Probierebüchlein*, pequeños manuales anónimos con procedimientos para la fundición de minerales y metales y para el ensayo de metales preciosos, aparecen en Alemania ya a comienzos del siglo XVI.

Otro de estos ejemplos es el de Gaspar de Morales, boticario de Paracuellos del Jarama que vivió en la segunda mitad del siglo XVI y principios del XVII. Su obra titulada *De las virtudes y propiedades maravillosas de las piedras preciosas* consta de tres libros, el segundo y tercero son una recopilación de propiedades físicas y virtudes de los minerales más conocidos en su tiempo.

Sin embargo, todos estos datos se apoyaban en resultados de tipo empírico. Es casi seguro que muchas referencias encontradas en escritos antiguos se refieran a piedras parecidas, es decir, lo que hoy conocemos como imitaciones. Un ejemplo de ello es el primer escrito que menciona al diamante en el libro del Éxodo, al citar al pectoral del gran sacerdote Aaron. La tercera piedra de la segunda fila del pectoral, según figura en el escrito, era un diamante “Yialhón” y estaba grabado y para ello hubo que esperar hasta el siglo XII.

También se decía que para conocer las piedras preciosas debían echarse en la lumbre y si se quemaban y no se derretían eran naturales, pero si en el fuego se derretían y perdían la forma era señal cierta de ser artificiales. Este método, aunque desechado como

técnica analítica por razones obvias, no dejaba de tener cierto sentido puesto que las únicas gemas artificiales que se conocían eran vidrios. Hay que tener en cuenta que los primeros vidrios artificiales se asocian con la cultura del antiguo Egipto. El cristal fue inventado en Venecia en la Edad Media.

Con el invento del microscopio se consiguieron ciertos avances en la época del Renacimiento. En el siglo XVIII se comienzan a asentar las bases de la química moderna.

Pero cuando la gemología se empezó a tratar como una rama especializada de la mineralogía fue en el siglo XIX, con el descubrimiento del alumbrado eléctrico, el análisis espectral, la clasificación periódica de los elementos, los rayos X y la radiactividad natural.

En el año 1891, Verneuil dio a conocer en la Academia de Ciencias de París un informe sellado sobre un nuevo y revolucionario proceso para la síntesis del rubí, proceso que reconoció públicamente en noviembre de 1902. En el informe, Verneuil citaba la construcción de un soplete invertido de oxígeno-hidrógeno —su famoso chalumeau— que básicamente se emplea aún hoy en día en la fabricación de muchos tipos de piedras sintéticas. Esto marcó el comienzo de la verdadera carrera para la obtención cada vez más perfecta de las piedras sintéticas.

Para qué sirve

La gemología es la ciencia que estudia las piedras preciosas. Su conocimiento proporciona información sobre aspectos técnicos y comerciales, permite conocer todas las gemas y minerales gemológicos que se utilizan en el comercio, capacita para identificarlas y distinguirlas de las obtenidas por síntesis, es decir, separar las de origen natural de las artificiales (imitaciones y sintéticas). Permite descubrir los diversos tratamientos que se realizan para mejorar su aspecto o color, la importancia de estas técnicas y su repercusión comercial.

El estudio de la gemología es indispensable para los joyeros y comerciantes de gemas, ya que adquieren una serie de conocimientos que les capacitan para conocer la naturaleza de los materiales que manejan; también para el lapidario, que estudia determinadas propiedades que le sirven para realizar su trabajo con mayor seguridad y facilidad, y para el público en general que conocerá, en cada caso, la naturaleza de las gemas que pueda adquirir.

La gemología es una ciencia independiente pero a la vez relacionada con la mineralogía ya que se estudian diferentes propiedades, composición, estructura, inclusiones, tratamientos, síntesis y yacimientos minerales.

En la actualidad, el mundo de las gemas se ha complicado extraordinariamente; el comercio mundial en estos momentos sufre la competencia, muchas veces fraudulenta, de numerosas síntesis y tratamientos que en muchas ocasiones se emplean engañosamente en su comercialización.

La segunda mitad del siglo XX se ha caracterizado por una carrera vertiginosa de avances tecnológicos, relacionados con los procesos de síntesis, la manipulación de las estructuras cristalinas y sus defectos, mejoras en la transparencia de las piedras preciosas, y en la creación o modificación del color. Esto ha propiciado que cada vez sea más difícil encontrar en el mercado ejemplares que no hayan sufrido, al menos, algún tipo de tratamiento.

Las grandes dificultades que muchas veces se presentan para identificar algunos tipos de síntesis y tratamientos ha obligado en el siglo XXI a los laboratorios gemológicos tradicionales a asociarse a diversos centros de investigación para poder utilizar todo tipo de tecnología avanzada para analizar e identificar las manipulaciones que se realizan en los materiales.

Trabajo que realiza

Muchos son los problemas que existen en la actualidad para la correcta identificación de las gemas. La caracterización de gemas naturales o sintéticas es parte del trabajo diario que realiza el gemólogo.

La técnica ha evolucionado de tal manera que la tarea de los gemólogos se complica cada vez más. Con la aparición de los reactores nucleares, los aceleradores de partículas y las unidades de irradiación gamma, comenzó la carrera para obtener cambios y mejoras de color del diamante y otras piedras preciosas.

Las gemas que presentan un color no deseable pueden mejorar su apariencia gracias a un gran número de tratamientos. Los más conocidos son los tratamientos térmicos que pueden realizarse con o sin aditivos. Los más frecuentes son los realizados en amatistas, berilos, calcedonias, corindones, topacio, zircón, etc.

El segundo tipo de tratamiento es el que se realiza por irradiación, la mayoría de los tratamientos que se obtienen por este método son estables. Hoy en día, la irradiación se aplica sobre todo en diamantes (verde y verde azul) y topacios (azul), utilizando neutrones por ser la radiación más rentable en el proceso de creación de centros de color.

El tercer tipo de tratamiento es el de las impregnaciones, tinciones, modificaciones superficiales, vidriado, relleno de fisuras, etc.



Figura 2. Gema.

Algunos tratamientos son tan habituales que no se consideran fraudulentos, por ejemplo, los térmicos en ciertos corindones, aguamarinas y zircones incoloros; las tinciones en las ágatas y calcedonias, etc. Pero el resto, sobre todo las irradiaciones, tratamientos térmicos por difusión etc., deben indicarse en la comercialización de las piedras preciosas.

Hasta el año 1972 se consideraba que ningún diamante podía haber sido irradiado con neutrones sin la intervención del ser humano, ya que no se admitía la presencia natural de neutrones libres en la naturaleza, al menos en cantidades suficientes para producir estos efectos. Pero ese año se dio a conocer un fenómeno realmente curioso en la compañía de minas Feanceville, en Gabón; se encontró un contenido demasiado bajo de uranio-235 en su producto. Rastreando el fenómeno se descubrió que ese mineral provenía precisamente de la cantera de Oklo. Este yacimiento de uranio abarca una superficie de aproximadamente 35.000 km². El impacto de este descubrimiento fue tan grande que se tomó la decisión de interrumpir la explotación del mineral para permitir estudios científicos del fenómeno.

Ahora se sabe que en esta región de Gabón estuvieron funcionando, hace aproximadamente 2.000 Ma, reactores nucleares naturales (14 descubiertos hasta la fecha), emitiendo flujos neutrónicos similares a los de los reactores artificiales más potentes.

Es muy difícil diferenciar si un diamante o un topacio han sido irradiados por neutrones en un laboratorio o por causas naturales. Pero hay una técnica, la espectrometría gamma de alta resolución, que en muchos de estos casos resuelve el dilema.

Otro de los grandes problemas es el tratamiento de alta presión (60 kilobares) y alta temperatura (2.000 °C) para modificar el color de los diamantes. Desde 1999 comenzaron a circular por el mercado abundantes diamantes incoloros de máxima calidad (D) y diamantes de color fantasía.

Uno de los procesos de tratamiento considerado de los más graves es el conocido como "difusión térmica" utilizado en corindones. Mediante este procedimiento se consigue introducir distintos elementos (Fe, Ti, Cr) en la estructura cristalina de zafiros y rubíes, elementos que hasta ahora eran los típicos causantes del color natural. El poder de penetración de estos elementos es muy limitado quedando confinados en una zona superficial relativamente delgada. Estos tratamientos son fácilmente identificables utilizando técnicas convencionales.

El mayor problema son los corindones tratados con berilio. En diciembre de 2001 se tuvo la primera noticia de un nuevo método de difusión realizado en Tailandia. Posteriormente se demostró que esta nueva técnica consiste en la implantación de berilio en la estructura cristalina del corindón, utilizando temperaturas muy altas. De este modo se consigue que simples trazas (menos de 10 partes por millón) de un elemento tan ligero sean suficientes para que zafiros incoloros o casi incoloros adquieran colores amarillo o naranja intensos estables y además de modo integral, por lo que no sirven las técnicas convencionales que se han estado utilizando para detectar los procesos tradicionales de difusión.

Los primeros años del siglo XXI han sorprendido a los laboratorios gemológicos con una nueva síntesis de diamante, los diamantes sintéticos CVD. En la actualidad se está promocionando en todo el mundo el crecimiento de diamante sintético de calidad gema mediante un método que no requiere altas presiones. Este método, conocido desde hace varios años como CVD, implica reacciones químicas en fase gaseosa que depositan capas de diamante sintético sobre un sustrato de diamante. Desde 2004 el método se está perfeccionando cada vez más, hasta el punto de que actualmente se consiguen fácilmente diamantes gema de máxima calidad y de tamaños extraordinariamente grandes.

De momento estos problemas se están intentando resolver mediante técnicas espectroscópicas de luminiscencia (catodoluminiscencia, fotoluminiscencia, etc.) a temperaturas criogénicas.

Herramientas que utiliza

El perfeccionamiento de las técnicas de microscopía óptica con la aparición de la lupa binocular y mejores sistemas de iluminación permitió que los estudios de inclusiones proporcionaran datos muy importantes mediante imágenes a veces extraordinariamente

bellas. Las inclusiones fluidas y las sólidas servían en muchos casos para diferenciar gemas naturales de las sintéticas e imitaciones, todo ello sin necesidad de realizar preparaciones destructivas de las gemas que, sin embargo, son indispensables para los estudios petrográficos.

Todo esto acompañado del empleo de la metodología convencional que se utiliza aún hoy en día para el análisis de los materiales gemológicos, es decir, medidas cuantificadas de ciertas propiedades físicas como son el índice de refracción, la birrefringencia y el peso específico, junto con la posibilidad de observar fenómenos como el comportamiento ante la luz ultravioleta y los rayos X y los espectros de absorción de la luz visible.

La primera mitad del siglo XX nos proporcionó nuevos descubrimientos: la teoría cuántica, la estructura planetaria del átomo, el núcleo atómico, el electrón, la mecánica cuántica, la óptica electrónica y el microscopio electrónico. La utilización de este último instrumento junto con la espectroscopía de rayos X demostró ser una herramienta muy útil para la solución de muchos problemas gemológicos.

Desde la antigüedad el hombre ha buscado la forma de poder aumentar su poder de resolución y de hacer visible lo invisible. La observación de objetos pequeños siempre ha estado entre los mayores desafíos que el hombre ha querido alcanzar y, sin lugar a dudas, el microscopio electrónico de barrido ha figurado entre las principales herramientas que le ha permitido salir victorioso de este reto. Pero el desarrollo de este formidable instrumento no fue un camino fácil.

El primer trabajo reconocido que describía la construcción de un aparato de microscopía electrónica de barrido se debe a Manfred von Ardenne, quien en el año 1938, construyó el primer microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) y comercialmente distribuido hasta 1965 por la compañía británica, Cambridge Instruments. El desarrollo de la microscopía electrónica permitió, entre otras cosas, alcanzar el nivel de resolución espacial que muchos investigadores de diversas disciplinas demandaban y fundar una rama de investigación que, a pesar de ser relativamente joven, ha avanzado de una manera vertiginosa en la ciencia contemporánea. Esta técnica se ha convertido en una fuente inagotable de información y desarrollo, no sólo por la resolución alcanzada, sino también por las capacidades de análisis de las técnicas asociadas a un microscopio. Este descubrimiento es uno de los más relevantes en el campo de aplicación de la gemología. Hace varios años se consideraba al ópalo como sílice amorfa con un contenido de agua del 2 al 20 por ciento. Por modernas técnicas de rayos X y microscopía electrónica, se ha comprobado que está formado por diminutas lepisferas compuestas por capas sucesivas de cristobalita y tridimita, de igual tamaño, dispuestas en forma de estructuras empaquetadas. El juego de colores que a veces presenta el ópalo noble, se consideraba que se

debía a la presencia de elementos cromóforos. Paradójicamente aún se puede leer esto en alguna de las famosas enciclopedias de nuestro tiempo que se consideran actualizadas.

Las imágenes electrónicas demostraron que se trata de un fenómeno de difracción de la luz visible, que se produce al actuar los paquetes de lepisferas como rejillas de difracción y que, según su orientación, el ángulo de incidencia de la luz y el tamaño de las esferas hacen que aparezcan placas que cambian de color: violeta a rojo, violeta a verde o azul.

La ausencia de juego de colores, como sucede en el ópalo común, se debe a una precipitación simultánea de esferas de distinto tamaño.

La idea del microanalizador electrónico, en el que un haz electrónico focalizado permite excitar una superficie tan pequeña como una micra cuadrada, fue patentada en los años cuarenta del siglo XX. A partir de aquí, la aplicación del microscopio electrónico de barrido más el sistema de energía dispersiva de rayos X, es decir, un sistema de imagen complementado con un análisis químico puntual absolutamente no destructivo, ha sido una arma insustituible para diferenciar gemas naturales de materiales sintéticos y gemas tratadas de las no tratadas, mediante el estudio de las inclusiones someras y de los rellenos provocados frecuentemente en las fisuras de los rubíes y los diamantes para mejorar su transparencia.

Pero hay que tener en cuenta que la alta tecnología favorece también los grandes avances en lo relativo a procesos de manipulación del color y a la transparencia de las gemas así como a la obtención de nuevas síntesis. Desgraciadamente estos avances van siempre por delante de los de identificación y, cuando se descubren, ya han sido, normalmente, introducidos en el mercado. Comienza aquí lo que los gemólogos llamamos la carrera de identificación de las nuevas técnicas que se han empleado en el nuevo tratamiento de mejora o cambio de color o en la nueva síntesis. Los inocentes tratamientos de siglos anteriores basados en el recubrimiento, el lacado y la tinción, de muy sencilla identificación, ya son historia.

Tenemos que tener en cuenta que no es incorrecto que los laboratorios investiguen y descubran nuevas síntesis o tratamientos siempre y cuando se realice un estudio exhaustivo que determine la forma idónea de identificación antes de que estos productos entren en el mercado.

Técnicas actuales

Para el tratamiento con berilio con el que se consigue una difusión total del color en el interior de la piedra, resultan totalmente inútiles cualesquiera de las técnicas convencionales. A esto hay que sumar que el berilio es un elemento muy ligero, además de presentarse en

muy pequeñas cantidades en gemas donde no se pueden emplear técnicas destructivas. Actualmente hay tres técnicas que resuelven el problema: el SIMS, el LA-ICP-MASAS y el LIBS. Las dos primeras se basan en la espectrometría de masas y la tercera en la espectrometría de emisión en el visible, mucho más económica. Las tres utilizan como fuente de excitación un láser de alta potencia, que produce un daño en la superficie de la gema de tamaño microscópico que hay que asumir.

La mayoría de los gemólogos saben que la General Electric Co. logró sintetizar diamantes en 1955. Lo que probablemente muchos gemólogos no conozcan es que se pueden obtener monocristales de diamante sintético utilizando el método de deposición de vapor químico. En este caso, las imágenes de luminiscencia de superficie utilizando el DiamondView proporcionan informes muy útiles para identificar todos los tipos de materiales sintéticos CVD, la topografía de rayos X también puede proporcionar evidencias de gran ayuda.

El problema surge en los diamantes sintéticos HPHT (altas presiones y altas temperaturas) de pequeño tamaño, lo que se conoce como mele, diamantes de peso entre 0,08 y 0,13 ct. En estos casos es necesario emplear técnicas de microscopía infrarroja en combinación con imágenes de catodoluminiscencia. Estas técnicas permiten separar diamantes naturales de sintéticos basadas en las características observadas en los espectros de absorción en el infrarrojo medio y las estructuras de crecimiento.

Análisis de fotoluminiscencia, topografía de rayos X o catodoluminiscencia se realizan para ayudar en la determinación de tratamientos HPHT (alta presión y alta temperatura) en diamantes para mejorar el color.

Con qué profesionales se relaciona

Los recientes avances anteriormente mencionados hacen que los gemólogos en la actualidad se relacionen con un gran número de profesionales: geólogos, físicos, químicos, lapidarios, historiadores del arte, cuerpos de seguridad del Estado, etc.

El grupo de Beers tiene en plantilla una gran cantidad de geólogos. Los recursos técnicos y su experiencia geológica se dirigen hacia el descubrimiento de importantes depósitos y a la investigación de otros ya conocidos en África, Canadá, Australia, Asia etc. Esta empresa, que en los años treinta creó el famoso eslogan "Un diamante es para siempre" y que popularizó el James Bond interpretado por Sir Sean Connery en 1971, fletó en 2006, junto con el Gobierno de Botswana, un zepelín para rastrear la zona desértica del Kalahari. El dirigible llevaba tecnología de última generación, suministrada por la empresa Bell Geospace para detectar, desde el aire, materiales portadores de diamantes. En función del tipo de búsqueda varían los parámetros para efectuar la

exploración. En el caso de los diamantes, la altura óptima es de unos 80 metros. El zepe-lín, de 78 metros de largo, es la solución perfecta para una tecnología que requiere el mínimo de vibraciones.

Actualmente, en Canadá se emplean aviones o helicópteros que sobrevuelan el polo Norte con geofísicos involucrados en el uso de técnicas magnéticas, gravimétricas y electromagnéticas.

El desarrollo de nuevas técnicas de análisis no destructivas ha supuesto un progreso, no sólo para la identificación de los materiales y sus tratamientos, sino también para la investigación de otras características de las gemas, antes imposibles de verificar. Con ello se han abierto campos de estudio en relación con las gemas incluidas en piezas con un interés histórico o artístico, de índole no comercial pero de gran relevancia en relación con el patrimonio cultural.

En España se han podido realizar, entre otros, el estudio de los materiales gemológicos del Tesoro de Guarrazar, las mesas de piedras duras del museo del Prado, y numerosas

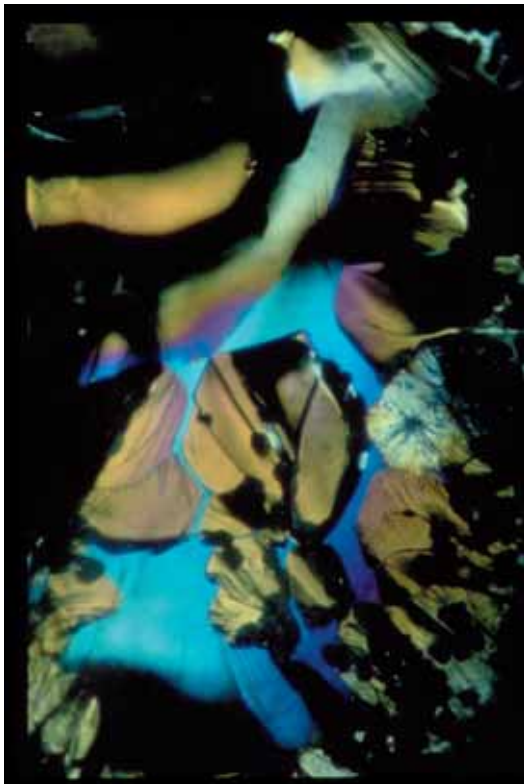


Figura 3. Gema.

piezas de joyería presentes en museos, como el Arqueológico Nacional, Lázaro Galdiano, Artes Decorativas y Museo del Prado.

Los gemólogos intervienen también en conservación del patrimonio o en procesos legales. En estos últimos trabaja con las fuerzas de seguridad del Estado para la identificación de piezas robadas. Si previo a su robo las piezas han sido certificadas en un laboratorio gemológico serio, esto ayudará a identificarlas en caso de aparición posterior. Hay que tener en cuenta que un certificado de análisis es el carné de identidad de una gema.

La lapidación, nombre que se emplea para el tallado y pulido de las piedras preciosas, es una operación que se realiza para resaltar al máximo las propiedades de color, brillo, lustre, transparencia, dispersión, resplandores, etc.

Se necesita un estudio previo, sobre todo en el caso del diamante, de propiedades como la exfoliación y estudios ópticos, para obtener el máximo de rendimiento. Una mala exfoliación puede destrozar un cristal muy valioso. En muchos casos se utilizan técnicas mecanizadas y láser, pero los grandes diamantes se siguen estudiando y tallándose de manera artesanal.

Por supuesto, su principal objetivo es relacionarse con el comercio de piedras preciosas, ya que gracias a los laboratorios gemológicos de prestigio se resuelven la mayoría de los problemas que afectan actualmente a la manipulación y repercusión comercial.

La gemología es una ciencia activa que se expande en todas las direcciones. Las ciencias tradicionales —mineralogía, geología y gemología se han extendido dando paso a la química, física, matemáticas, etc.—, para poder resolver muchos de los problemas actuales con que se encuentran los gemólogos del siglo XXI.

Quiénes son sus principales clientes

El comercio de joyería es, sin duda, el destino más importante al que van encaminados los estudios de gemología. En la actualidad nadie pone en duda que quienes se quieren dedicar al comercio de la joyería tienen que estudiar gemología. Pero no debe confundirse gemología con joyería; en ocasiones se estudia aquella creyendo que al terminar se es joyero. Pero después de todo lo explicado anteriormente, se tendrá claro que la gemología sólo estudia la parte técnica relacionada con las gemas, ayudando a su conocimiento e identificación, y proporciona —y esto es muy importante— una amplia cultura sobre todo lo relacionado con el mundo y el comercio de las gemas.

La fabricación, cada vez más abundante y diversificada, de materiales, con características de identificación difíciles de resolver, colocan al profesional ante situaciones de responsabilidad comercial y legal totalmente nuevas. En casos de ventas fraudulentas es imprescindible la actuación de un perito gemólogo, que intervenga ante el juez, quien por regla general tendrá claro y declarará culpable al profesional de la joyería.

Los laboratorios gemológicos de reconocido prestigio son imprescindibles —en relación directa con la importancia económica de la transacción— y ayudan a desarrollar una correcta actividad profesional. El profesional de la joyería de este modo está obligado a garantizar lo que vende.

Este libro se terminó
de imprimir en la
Navidad de 2009.



Ilustre Colegio
Oficial de Geólogos

c/ Raquel Meller, 7
28027 - Madrid
icog@icog.es
www.icog.es

ISBN: 978-84-9200-978-7



9 788492 009787