

400840
MADE IN SPAIN



DISCURSO DE APERTURA

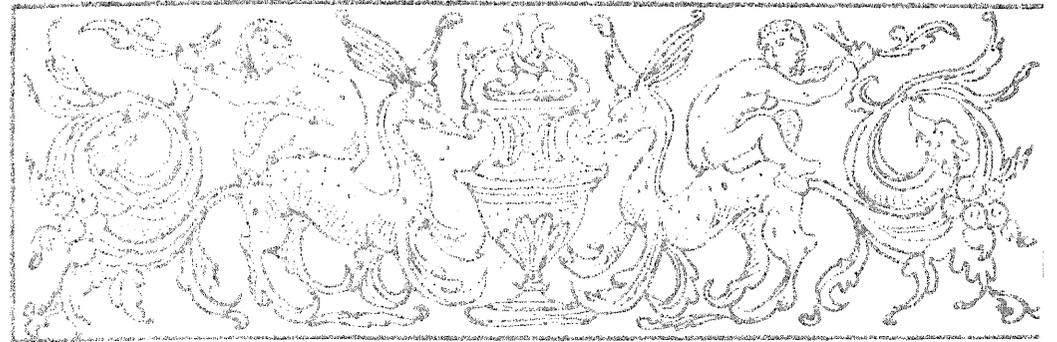
BOF EL CATEDRATICO
DE LA F ULTAD DE CIENCIAS

Dr. D. G. E. M.ª FONTBOTE

UNI ERIDAD DE GRANADA

1966

1967



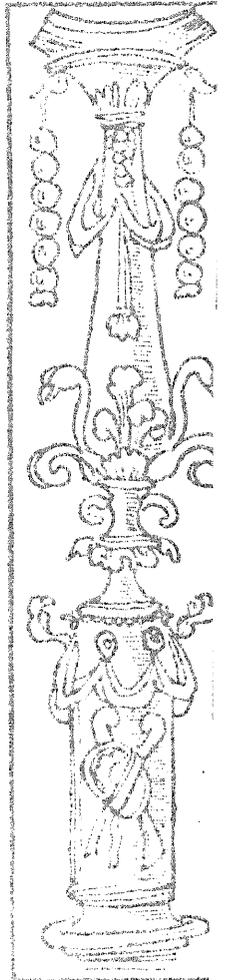
DISCURSO
DE
APERTURA

POR EL CATEDRÁTICO
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

DR. D. JOSE M.^a FONTBOTE



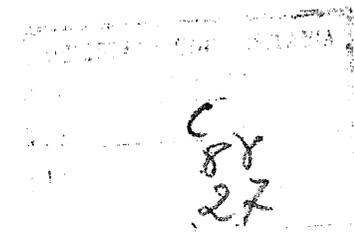
UNIVERSIDAD DE GRANADA



1966

1967

LA GEOLOGIA EN LA PROSPECCION DE
YACIMIENTOS MINERALES



DISCURSO DE APERTURA

POR EL CATEDRÁTICO
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

Dr. D. JOSE MARIA FONTBOTE



UNIVERSIDAD DE GRANADA
1966-67



EXCELENTÍSIMO SEÑOR MINISTRO;

EXCELENTÍSIMO SEÑOR RECTOR MAGNÍFICO;

EXCELENTÍSIMOS E ILUSTRÍSIMOS SEÑORES;

SEÑORAS Y SEÑORES;

SEÑORES PROFESORES Y ALUMNOS DE LA UNIVERSIDAD:

El ritualismo de nuestra vida académica me impone hoy el cumplimiento de un deber que, si bien implica para mí un alto honor, hubiese deseado fuese realizado por otros de mis compañeros de Claustro con muchísimos más merecimientos. Sólo la rigidez del turno reglamentario establecido puede justificar el que sea yo quien tome la palabra en esta ocasión solemne de la apertura del curso, que este año se ve tan realizada por la presidencia del Excmo. señor Ministro de Educación y Ciencia.

En primer lugar, y conforme a la tradición ya afianzada, para dar cuenta, de modo sucinto, de algunas variaciones en nuestro Claustro.

En el curso de 1965-1966 que acaba de finalizar, hemos tenido, como la vida de toda comunidad un poco numerosa, ocasión de celebrar la grata incorporación de nuevos miembros. Especialmente en

Depósito Legal: GR - 183 - 1966

nuestro caso la de nuevos profesores a las cátedras de esta Universidad.

La satisfacción que nos ha producido estos acontecimientos sólo se ha visto empañada por la melancolía de la despedida de uno de los que hasta ahora ha sido digno y querido compañero de este Claustro. Al cumplir su edad reglamentaria, D. JOSÉ MARÍA MUÑOZ MEDINA ha dejado la cátedra de Botánica en la Facultad de Farmacia que había ocupado hace casi 25 años y en la que se ganó siempre el afecto de sus alumnos y el de sus compañeros. Puede estar seguro de seguir contando con el mismo, aún acrecentado, durante los largos años que deseamos continuar disfrutando de su compañía, y en los que su saber, su experiencia y su entusiasmo, seguirán siendo útiles para la Ciencia.

La Facultad de Ciencias ha celebrado gozosamente la reincorporación de D. JUSTO MAÑAS, a su cátedra de Física, después de una ausencia de sólo dos años según la medida del tiempo, pero que según el reloj del sentimiento nos ha parecido muchísimo más larga. También, la de D. ALFONSO GUIRAUM y de D. INOCENCIO ALDANONDO, ambos a la nueva Sección de Ciencias Matemáticas. De los grandes méritos de ambos esperamos fundadamente copiosos frutos, que en el caso de D. ALFONSO GUIRAUM hemos tenido ya ocasión de conocer en los largos años en los que había venido colaborando en nuestra Facultad, como Profesor y como principal organizador y coordinador de las enseñanzas de Matemáticas.

La Facultad de Derecho ha tenido el gozo de recibir a D. ANTONIO GULLÓN y a D. MATÍAS CORTÉS, en las cátedras de Derecho Civil y de Economía Política, respectivamente. El Claustro de la de Filosofía y Letras se ha visto acrecentado con la incorporación de don MARCELO VIGIL, D. LEONARDO POLO y D. VIDAL EUGENIO HERNÁNDEZ, que pasan a ocupar respectivamente Historia Antigua Universal, de Fundamentos de la Filosofía e Historia de los Sistemas Filosóficos, y de Filología Latina. Finalmente, en la de Medicina, la cátedra de Terapéutica Física ha sido confiada a su nuevo titular D. MANUEL GIL GAYARRES.

A todos nuestros compañeros me cabe hoy la satisfacción y el honor inmerecido de dirigirles la bienvenida en nombre del Claustro y también en el mío propio.

Con todo fundamento esperamos óptimos frutos en su labor docente e investigadora, cuya realización en esta Universidad deseamos se prolongue muchos años.

Y, en segundo lugar, me dispongo ahora a cumplir la otra parte —mucho más difícil y comprometida— de mi deber antes referido. La de exponer ante esta Asamblea alguno de los temas propios de la cátedra que ocupa quien tiene el honor de dirigirles la palabra en esta ocasión.

El tema elegido es: La Geología en la prospección de los yacimientos minerales.

INTRODUCCION

Los orígenes de la Geología están íntimamente relacionados con la Minería. En el desarrollo de aquella Ciencia, las observaciones efectuadas en minas y canteras y, en general, en todo lugar donde el hombre explota o ha intentado explotar materias primas minerales, han sido fuentes de muchas ideas e interpretaciones de gran trascendencia para su progreso (1). Y uno de los acicates más importantes de este mismo progreso es, sin duda, aunque pueda obrar en cierto modo indirectamente, el afán de conseguir un aprovechamiento más intenso, más fácil, de tales recursos.

A su vez, los conocimientos geológicos prestan actualmente una fundamental contribución a este último objetivo.

La gran mayoría de los geólogos del mundo (más de 100.000) se dedican a investigaciones de finalidad práctica inmediata. Aproximadamente la mitad de ellos en empresas privadas o servicios estatales para la prospección de nuevos yacimientos de petróleo.

(1).—Son varias las historias escritas con alguna extensión sobre el desarrollo de la Geología. Para los aspectos que se tratan más especialmente en esta exposición son especialmente recomendables las obras de ADAMS (1954) y FISCHER (1961). En las de GEIKIE (1962) y HÖLDER (1960) se encontrarán también interesantes noticias sobre la evolución general del planteamiento de las grandes cuestiones fundamentales de la Geología.

A su vez, las crecientes disponibilidades de agua exigidas por la industria, los regadíos, y el abastecimiento de poblaciones, obligan a un más exacto conocimiento de los posibles recursos en aguas subterráneas con vistas a su alumbramiento y —no menos importante— a su racional explotación. Con ello, aumenta rápidamente el número de geólogos especializados en Hidrogeología.

Igualmente aumenta el número de los que colaboran en la prospección de yacimientos minerales diversos, aparte de los de petróleo antes aludidos.

Ahora bien, esa situación es reciente. Hace solamente un siglo, de los pocos centenares geólogos (tomando esta denominación en una acepción más bien amplia) entonces existentes, únicamente una pequeña minoría participaba de modo asiduo en tales actividades. El caso concreto del petróleo es interesante e ilustrativo, y creo que merece una breve digresión.

Los primeros yacimientos de petróleo en los Estados Unidos fueron descubiertos hace poco más de un siglo, sin concurso de geólogo alguno (2). Hasta hace unos sesenta años, las consultas a geólogos solían ser muy esporádicas por las empresas de petróleos. Luego fueron multiplicándose, y desde hace unos decenios, puede decirse que no existe ninguna empresa o servicio estatal dedicado a la prospección de petróleo sin el correspondiente equipo geológico, y, como antes se ha indicado, el número de geólogos que trabajan en tales equipos es elevadísimo.

Ese cambio de situación no es brusco, pero sí progresivamente acelerado. Del número total de geólogos —que a su vez aumenta bastante rápidamente (3)— una proporción creciente se dedica a las

(2).—Para ser más exactos, tal concurso sí existió, por parte de Benjamín Silliman, renombrado profesor de la Universidad de Yale. Pero no se trató de una contribución científica, sino financiera.

(3).—En estos últimos años el aumento se ha hecho menor en Estados Unidos, Francia y varios países más. La tendencia parece deber continuar en los años inmediatamente próximos. En parte considerable se explica por una disminución del ritmo de las prospecciones en la mayoría de las grandes empresas de petróleos, en relación con el aumento más rápido de las reservas descubiertas que el del consumo.

aplicaciones prácticas de la Geología. Ello se explica por dos razones, no independientes.

Una de ellas es la mayor madurez de la propia ciencia geológica. Al conocerse mejor la constitución, la estructura, la evolución de la corteza terrestre, inevitablemente se adquieren criterios más seguros para el descubrimiento de las sustancias útiles que se encuentran en esa corteza.

La otra es la creciente necesidad de materias primas minerales, en cantidades cada vez mayores, y, también, de naturaleza más variada. A este último respecto, hay que recordar que el desarrollo tecnológico hace que cada vez sean más numerosos los elementos químicos utilizados (4), y hoy por hoy (5), en su inmensa mayoría, es la corteza terrestre la que los suministra. Ahora bien, los yacimientos minerales son recursos naturales que no se reponen, y el hombre se enfrenta con la necesidad de descubrir otros nuevos. Como veremos más adelante, ello obliga a una creciente aplicación de los conocimientos científicos, sobre todo geológicos.

En esa aplicación, las investigaciones realizadas con tales finalidades prácticas ensanchan notablemente el campo de las observaciones y se enriquece así la propia ciencia. Aunque, debido a planteamientos defectuosos que son frecuentes en esas investigaciones aplicadas, el rendimiento científico de las mismas es, en conjunto, indudablemente bastante menor de lo que sería posible, su contribución es de fundamental importancia, en varias de las ramas de las ciencias geológicas. Por ejemplo, los rápidos progresos alcanzados por la Sedimentología en los últimos lustros se deben en parte muy

(4).—Sería instructiva la comparación del número de elementos químicos que forman parte de modo esencial de las máquinas e instrumentos típicos de cada una de las distintas épocas de dicho desarrollo. Si para un avión a reacción intervienen así más de la mitad de los del sistema periódico, en la locomotora a vapor, buen exponente de la técnica del siglo XX, no llegaban a 20. Muchos menos, en cualquier máquina de la Antigüedad, y sólo 2 en los útiles de sílex. También en este aspecto el dominio de la Naturaleza por el hombre se va haciendo cada vez más completo, y llega incluso a obtener... elementos nuevos.

(5).—Es probable que la participación del agua del mar en ese abastecimiento, limitada hoy a pocos elementos, se haga progresivamente importante.

considerable a investigaciones realizadas con vistas a la prospección del petróleo.

De esa manera, las aplicaciones de la Geología impulsan el progreso general de esta Ciencia, y que se va así capacitando para hacer frente a nuevas aplicaciones cada vez más rigurosas y más variadas. Sobre esta interdependencia, nunca se insistirá demasiado.

Me ha parecido oportuno tratar aquí de algunos aspectos de esa relación, de esas aplicaciones de la Geología. Precisamente, a la prospección de yacimientos minerales.

Y, dentro de este campo, que es inmenso, dedicaré una mayor atención a la de yacimientos de menas metálicas. Tanto por ofrecer una perspectiva histórica más dilatada, como por entroncarse más íntimamente con conocimientos de todas las especialidades de la Geología.

Como trataré de mostrar, esas aplicaciones son relativamente modernas; por lo menos, sólo en tiempos bastantes recientes han alcanzado notable difusión. Puede resultar instructivo el dilucidar el porqué de ese retraso. Entre otros motivos, para ayudar a una mejor orientación de los futuros geólogos en ese dominio. También puede ser interesante, pues ilustra bastante bien la influencia que llegan a tener ciertos factores culturales, insospechados a primera vista, sobre determinadas corrientes del pensamiento científico.

LA NOCIÓN DE YACIMIENTO MINERAL

Ante todo, tratemos de precisar la noción de "yacimiento mineral". Como veremos, no se trata de un concepto perfectamente definido. Quizá por ello será mejor abordarlo mediante un rodeo.

Es bien conocida la gran desigualdad de la abundancia relativa de los elementos químicos en la corteza terrestre y, desde luego, en el Universo.

Por lo que se refiere a la corteza, las modernas investigaciones geoquímicas han mostrado que el 98,6 % de su masa está formado solo por ocho elementos: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio (por orden decreciente de abundancia; al oxígeno le corresponde el 47,5 %, y al magnesio 2,2 %). El 1,4 % restante se reparte entre todos los demás elementos, por cierto, muy desigualmente.

Ahora bien, el contenido de un elemento químico determinado varía de unos puntos a otros de la corteza. Estas variaciones son importantes, para la mayoría de los elementos. Para varios de ellos, llegan a ser muy grandes. Sin recurrir a ejemplos extremados, baste recordar que el promedio del contenido de carbono es de sólo 0,03 % en las rocas ígneas, de 0,6 % en las pizarras, de 10 % en las calizas, y rebasa el 90 % en bastantes antracitas; el cobre forma aproximadamente sólo un 0,007 % de la masa total de la corteza, pero existen masas rocosas bastantes grandes que contienen más de 1 %, y puede encontrarse nativo con concentraciones que se acercan al 100 %.

Muchos —no todos, pues los hay que se hallan en todas partes dispersos en ínfimas cantidades,— de los elementos se hallan concentrados en ciertos puntos de la corteza, en determinados minerales y rocas. Los contenidos de tales elementos, en esos minerales y rocas, pueden ser muchísimo más elevados que los promedios correspondientes al conjunto de la corteza terrestre. Pues bien, tales concentraciones suelen ser denominadas "yacimientos minerales" (6). De hecho, tal denominación sólo se aplica si la explotación por el hombre es posible. Como sea que esa posibilidad depende de factores muy diversos, algunos de los cuales (económicos, tecnológicos, etc.) varían según lugares y épocas, se comprenderá fácilmente que la delimitación del concepto sea inevitablemente imprecisa. Por el momento, nos bastará así. De todos modos, no olvidemos que ciertas masas mi-

(6).—En castellano existe el castizo término de "criadero", en gran parte equivalente, pero cuyo uso suele ser restringido al caso de menas metálicas. Por otra parte, sugiere inmediatamente una idea genética falsa, la de la continua reposición de las substancias. No obstante, puede seguir usándose sin riesgo, pues tal idea está ya superada.

nerales que no han sido económicamente explotables en el pasado pueden llegar a serlo, a favor de circunstancias de mayor escasez, o bien mediante un nuevo método de beneficio, o por efecto de variaciones en otros de los factores aludidos.

En resumen, consideramos como “yacimientos minerales” las concentraciones naturales de ciertos elementos químicos, notablemente más altas que en el promedio de la corteza terrestre, que son susceptibles de explotación por el hombre.

No es obligado que la explotación se haga para el beneficio de uno o unos elementos químicos; puede hacerse para la utilización de las propias combinaciones naturales en que se encuentren. Así, la mayor parte de la fluorita que se extrae de sus yacimientos no se emplea para la obtención del flúor, sino como tal fluoruro cálcico, en la electrometalurgia del aluminio.

OJEADA RETROSPECTIVA

El aprovechamiento de los recursos del reino mineral comenzó en los albores de la Humanidad. En modo alguno tuvo que esperar el desarrollo de las Ciencias Geológicas, el cual es muy reciente (7).

Durante las larguísimas etapas de su prehistoria y también en las épocas históricas, con la excepción parcial de los últimos tiempos, el hombre ha buscado las piedras, las menas, el agua subterránea, que ha ido necesitando, guiado solamente por criterios empíricos de variable valor, cuando no ha recurrido también a la propia magia. Si esta última, no es preciso decirlo, ha sido totalmente inoperante, la experiencia lentamente acumulada, aunque mezclada inevitablemente con falsas ideas y erróneas apreciaciones, le ha permitido el descubrimiento de yacimientos minerales, en muchos casos de la ma-

(7).—Véanse, por ejemplo, las obras citadas en la nota (1).

yor importancia. Sin salir de España, por ejemplo, podemos comprobar que la mayoría de los importantes —Río Tinto, Almadén, Linares, Mazarrón, etc.— era ya conocida y objeto de explotación en tiempos anteriores a la colonización romana. Comprobaciones similares pueden hacerse en muchos otros países, especialmente en el ámbito de las viejas civilizaciones mediterráneas y de Oriente.

Sin duda alguna, el llamativo aspecto que presentan, por sus formas y coloraciones, muchos de los minerales interesantes, o los propios productos de su alteración por acción de la intemperie, junto con la experiencia lentamente acumulada, orientaron al hombre hacia el descubrimiento de muchos de los yacimientos. En otros casos debieron mediar trabajos más metódicos, de toma de muestras y su correspondiente preparación mecánica, su lavado, para concentrar eventualmente las sustancias útiles buscadas, aplicando también la experiencia conseguida en otros yacimientos ya conocidos.

En épocas ya mucho menos remotas, por lo menos en el ámbito cultural europeo, se va atendiendo más y más a lo que podría llamarse la “sintomatología” de los yacimientos. Se correlacionan ciertas observaciones, de modo, aún empírico, pero que permite ya establecer pronósticos sobre la mayor o menor probabilidad de hallar tal o cual mineral útil en una región determinada, a la vista de la naturaleza de las rocas que se encuentran en ella, de ciertas disposiciones o estructuras de las mismas. En la baja edad media, especialmente, empiezan a aparecer escritos en los que se alude a tales correlaciones, de las que la posteridad ha mostrado que una parte estaba correctamente establecida.

De todos modos, como puede fácilmente comprenderse, la prospección de yacimientos no podía hacerse racionalmente fundada hasta que fuese debidamente conocida la génesis de los mismos, lo que en cierto modo podría llamarse su “etiología”. Pero, para ello, ha habido que esperar hasta que pudiese ser abordado este estudio genético, lo que requería a su vez un notable avance en los conocimientos geológicos todos. Y ha sido preciso remover el enorme obstáculo que han representado las ideas vigentes, sobre esa génesis,

desde la Antigüedad. Pues contrariamente a lo ocurrido en otros campos del saber, el legado de la Antigüedad ha sido no sólo erróneo, sino activamente desorientador (DON LEET y LEET, 1961).

Ese legado se debe principalmente a Aristóteles. En el libro IV de su *Meteorologica*, este autor explica la formación de los minerales por la acción del sol y de los astros en general sobre los elementos "tierra" y "agua" en el seno de nuestro planeta. Según las proporciones entre dichos "elementos", y según cual fuese el astro actuante en cada caso, habrían resultado distintos metales y minerales.

Con el prestigio inmenso que mantuvo Aristóteles hasta el Renacimiento, y con el valor dado a los argumentos de autoridad, se comprende que en Europa esas ideas hayan sido vigentes durante casi 1.800 años, sin sufrir más que algunos retoques secundarios.

Antes de seguir en esa ojeada retrospectiva, forzosamente muy rápida, parece interesante poner de relieve una característica fundamental de las ideas de Aristóteles sobre la génesis de los yacimientos.

Me refiero a su atribución a causas lejanas, *externas* con respecto a la corteza terrestre. En ello, Aristóteles sigue una tendencia, tal vez innata en el hombre, sobre cuyos efectos en el desarrollo del pensamiento científico, y más concretamente sobre la interpretación de la génesis de los yacimientos minerales, ha insistido AMSTUTZ (1959), (1960), (1964), con gran brillantez y agudo espíritu crítico.

En el fondo, se trata de la tendencia a invocar causas lejanas, aureoladas de especial prestigio, para explicar los hechos y fenómenos de la naturaleza que, por su relativa excepcionalidad, u otros motivos, llamen más poderosamente la atención del hombre. Inconscientemente, Aristóteles debió reaccionar ante los metales, y sus menas, de modo comparable al hombre primitivo. Este habría fácilmente recurrido a intervenciones mágicas, sobrenaturales, para explicarse su génesis; a Aristóteles evidentemente tales explicaciones no podían satisfacerle en modo alguno, pero de entre las causas naturales eligió las más "lejanas" y "prestigiosas". Pero no hay que sonreirse ante esos falsos pasos; la tendencia en cuestión está poderosamente arraigada en el hombre, y aún en el propio mundo científico actual

encontramos fácilmente huellas de la misma. Más adelante tendremos ocasión de comprobarlo.

Sin perjuicio de la existencia de algunos atisbos esporádicos en autores anteriores, es a Agricola a quien corresponde el mérito de haber planteado la cuestión de la génesis de los yacimientos sobre bases científicas.

Nacido en 1494, Agricola es un contemporáneo de Leonardo de Vinci, de Erasmo, de Copérnico. Es un hombre de su época y participa de las inquietudes de sus grandes coetáneos. Estudió en las Universidades de Leipzig, Bolonia y Padua, en las que adquirió un profundo conocimiento de las lenguas clásicas y una amplia cultura filosófica. Más tarde, estudió y se graduó en Medicina, en la Universidad de Ferrara. De regreso de Italia, en 1527 fue contratado como médico del municipio en la ciudad de Jachimov (8) (Bohemia), centro de un importante distrito minero. En 1534 se trasladó a Chemnitz, capital de una de las principales regiones mineras de Sajonia, para ejercer también su profesión. Su vida, terminada en 1555, es bastante bien conocida.

Aparece Agricola como un hombre extraordinariamente inteligente y culto, interesado como Leonardo por todas las ramas de la Ciencia, de gran sensibilidad estética, y admirado por sus contemporáneos. Sin dejar de ejercer con todo prestigio su profesión, dedicó una especial atención a la Minería, en su acepción más amplia, desde la extracción de los minerales hasta la metalurgia. Escribió nada menos que siete libros que tratan de temas geológicos y mineros, de los cuales el que alcanzó mayor difusión fue *De Re Metallica*, verdadero tratado de Minería y Fundición. Pero no es éste, ni tampoco el *De Natura Fossilium*, que puede ser considerado como el primero que se escribió sobre Mineralogía propiamente dicha, el que más nos interesa aquí. Es otro, *De Ortu et Causis Subterraneorum*, en el que

(8).—Localidad más conocida con su nombre alemán Sankt Joachimsthal. Famosa, sobre todo, por sus florecientes minas de plata, en la Baja Edad Media y en la Moderna. También se han explotado minerales de cobalto y uranio.

refuta con rigurosa argumentación las ideas de Aristóteles sobre génesis de yacimientos minerales, todavía vigentes entonces, y aún contaminadas con errores posteriores debidos a la influencia de los alquimistas. Y, lo que es más importante, insiste sobre la necesidad del estudio directo de la naturaleza, y dejar de lado los argumentos de autoridad, si se quiere penetrar en sus secretos.

Si su contribución como crítico de las ideas anteriores sobre la formación de los yacimientos minerales fue de la mejor calidad, la propia aportación de Agricola a esta cuestión fue más limitada y tiene un valor más desigual. Hizo observaciones muy atinadas sobre los sistemas de fracturas en las que se alojan los filones metalíferos, tan abundantes en las regiones que estudió; y correctamente relacionó la formación de las fracturas con movimientos de la corteza terrestre. También fué pertinente su distinción entre las aguas subterráneas de origen superficial, procedentes de la infiltración, y las de origen profundo, aunque exageró la importancia relativa de estas últimas. Unas y otras —muestra Agricola— son capaces de disolver substancias de unos puntos, para redepositarlas en otros, a lo largo de las fracturas y formar así los filones.

Evidentemente, la visión de Agricola quedó bastante limitada, por cuanto los yacimientos que tuvo ocasión de estudiar son filonianos, y hoy sabemos que estos últimos no son más que una parte minoritaria, si bien muy importante, del total de los existentes. Podría objetarse que Agricola, como Aristóteles, también ve los yacimientos como resultado de algo que actúa desde fuera; en ese caso, la solución mineralizadora, que acarrea las substancias que formarán el filón propiamente dicho. Pero obsérvese que ahora ya no se trata de distancias astronómicas, sino que todo el proceso se desarrolla en el propio seno de la corteza terrestre, y son las aguas —parte de las cuales, el propio Agricola lo indica claramente, son las de infiltración— el agente de transporte. Además, hay que tener en cuenta dicha limitación forzada de las observaciones; quedará siempre sin respuesta la cuestión de lo que habría pensado Agricola ante yacimientos de otras características, y que él no tuvo ocasión de observar.

A pesar del valor —aún mayor en sus planteamientos que en su propia aportación— de la obra de Agricola, la génesis de los yacimientos permaneció todavía oscurecida hasta largo tiempo después por la inerte aceptación general de las erróneas interpretaciones anteriores. Alargaría excesivamente esta exposición el tratar de seguir las nuevas aportaciones, en general poco positivas, que diversos autores fueron haciendo durante tiempos posteriores, hasta finales del siglo XVIII (9).

Con ello, llegamos a la época en que, con Werner y especialmente con Hutton, puede ya hablarse propiamente de la constitución de un cuerpo doctrinal con el que se individualiza ya la Geología como ciencia propiamente dicha.

Fácilmente se comprenderá que en toda esa dilatadísima época anterior a tal constitución, la prospección de yacimientos se hizo sin aplicación de conocimientos geológicos, salvo casos esporádicos, y sin tener clara conciencia de ello.

WERNER Y HUTTON

A lo largo del siglo XVIII, más especialmente transcurrida ya su primera mitad, se advierte un mayor rigor científico en los escritos que tratan de la constitución de la Tierra, de los minerales, de los fenómenos geológicos.

Lentamente, pero de modo seguro, los datos de observación ganan posiciones. Las viejas interpretaciones basadas en la especulación son consideradas con creciente desconfianza. Aparecen todavía algunas obras como las de Buffon, en las que dichas cuestiones son tratadas sin verdadero espíritu científico. Pero cada vez son más nu-

(9).—Más positivas fueron las aportaciones en otras ramas. Véase también ADAMS (1954) y HÖLDER (1960).

merosas las de otros autores —Guettard, Desmarest, Lomonosov, de Saussure, Lehmann, Arduino, Füchsel, Moro, Pallas y otros de la misma época— que dan cuenta de observaciones rigurosas, y en las que se proponen interpretaciones bien fundamentadas.

Quedaría fuera de los límites que me he fijado, el presentar y comentar esas aportaciones. Me limitaré a resaltar que contribuyeron eficazmente al progreso de la Geología en sus primeros tiempos.

En 1756 fué creada la Escuela de Minas de Freiberg, en Sajonia, que muy pronto adquirió merecido prestigio por la calidad de sus enseñanzas. Sobre todo, desde 1775, año en que Werner ocupó su cátedra de Minerología.

Fundamental importancia tuvo la contribución de Werner, aunque su obra escrita sea realmente poco considerable. La tuvo muy principalmente por su labor docente, y en tal grado, que se le considera con justicia, junto a Hutton, como fundador de la Geología.

Dotado de excepcionales cualidades para enseñar, atrajo discípulos numerosos de diversos países. Además de exponerles de modo excelente la Mineralogía, su especialidad predilecta, les inculcaba profundamente el espíritu de observación. Para ello convivía con sus discípulos en largas sesiones de trabajos de laboratorio y en excursiones de estudio.

Desde el punto de vista de las grandes cuestiones de la Geología, la aportación de Werner contenía aún errores bastante graves. Comunmente se suele denominar doctrina o teoría “neptunista”, por valorar —mejor, sobrevalorar— la importancia alcanzada por los procesos sedimentarios en el ámbito oceánico, en la formación de las rocas y minerales de la corteza terrestre. Al mismo tiempo, consideraba los fenómenos volcánicos como algo muy accesorio y de muy escasa transcendencia. Incluso rocas, como antiguos basaltos, cuyo origen volcánico está fuera de toda duda, los llegó a suponer de origen sedimentario.

A pesar de su extremismo, la doctrina neptunista contiene aportes positivos que ejercieron una influencia beneficiosa, de modo directo o indirecto. El papel de la sedimentación en la génesis de mi-

nerales y rocas fue considerado con mayor atención que antes. Por otra parte, contribuyó a disminuir la tendencia a invocar la acción de fenómenos naturales más o menos extraordinarios en perjuicio de causas más “corrientes”.

Desde el punto de vista de la génesis de yacimientos minerales, el neptunismo llega hasta a pretender que los filones se han formado por relleno de grietas y cavidades abiertas en el fondo oceánico, mediante procesos de precipitación de sustancias contenidas en el agua de mar (10).

A todas luces ésto es falso. No lo es, en cambio, el papel importantísimo de la sedimentación en el origen de muchos y ricos yacimientos minerales de otras clases. Incluso de menas metálicas, según van demostrando las modernas investigaciones más solventes, como ya se recordará más adelante.

Por otra parte, los discípulos de Werner contribuyeron poderosamente a las primeras investigaciones mineralógicas y geológicas que se llevaban a cabo en amplias regiones de Europa. Muchos de ellos, por lo demás, enfrentados ante los hechos con la buena formación adquirida en Freiberg, fueron abandonando muchos de los errores acarreados la extremosidad del neptunismo.

A ese abandono, contribuyó decisivamente la obra de Hutton.

Es a Hutton a quien se debe el primer tratado de Geología, propiamente dicho: *The Theory of the Earth with Proofs and Illustrations* (11), publicado el año 1795 en Edimburgo. Hutton no fué un profesor, como lo era Werner. Había estudiado Medicina en Leiden y en París, pero no ejerció nunca la profesión. Adquirió además una buena formación como químico. Después de dirigir durante unos años

(10).—Según Werner, las aguas del Océano primordial habían cubierto la Tierra entera y contenían grandes cantidades de sustancias disueltas y en suspensión; su gradual depósito había ido formando la corteza terrestre propiamente dicha. Werner creía que el granito se había originado por precipitación química, en los primeros tiempos de ese proceso.

(11).—Obra que fué precedida ya por algunos artículos, en los que Hutton avanza una parte de las nuevas ideas, y hace importantes objeciones a las hipótesis neptunistas.

la explotación de una finca rústica, en 1768 se estableció en Edimburgo y se dedicó intensamente a las investigaciones geológicas.

El ambiente científico de la capital de Escocia era propicio y la región es privilegiada, por cuanto se pueden observar en ella una gran diversidad de minerales, de rocas, de estructuras geológicas. Sin embargo hay que reconocer que, sin sus cualidades de verdadero genio, Hutton no habría podido llegar a donde llegó. Todavía hoy, a pesar de su estilo descuidado y prolijo, la lectura de muchos capítulos de la *Theory of the Earth* es interesante y sugerente, y muestra hasta qué punto los principios fundamentales de la Geología fueron ya bien percibidos por su autor.

Gracias, sobre todo, a la obra de Playfair *Illustrations of the Huttonian Theory*, escrita en un lenguaje mucho más elegante y claro, las ideas de Hutton se difundieron ampliamente... y entraron en conflicto con las de Werner.

Los partidarios de las primeras, llamados "plutonistas", por cuanto Hutton atribuía una gran importancia a los procesos de formación de minerales y rocas a alta temperatura, sostuvieron con los neptunistas largas, apasionadas y memorables contraversias que, por cierto, son evocadas por Goethe en los actos II y IV de la segunda parte de *Fausto* (12). Débese advertir que los plutonistas —más que el propio Hutton— exageraron también mucho, por su parte, y dado que el resultado de dichas polémicas fué en definitiva más favorable a ellos, algunos errores importantes se deslizaron en la corriente general del pensamiento geológico. En parte, contribuyeron a retrasar la correcta interpretación de muchos tipos de yacimientos minerales, cuya génesis ha venido siendo atribuída, muchas veces sin casi discusión, a procesos magmáticos, cuando en realidad no es así.

(12).—Principalmente en el acto IV (escena 1.^a). El diálogo de Fausto y Mefistófeles deja traslucir claramente la preferencia de Goethe por el neptunismo. Su concepción majestuosa del lento y continuado desarrollo de la corteza terrestre en el seno del Océano, como nota ADAMS (1938), armoniza mejor con los ideales goethianos, que no el plutonismo, por la importancia que éste concede al volcanismo y a otros fenómenos violentos.

En realidad, ni Hutton ni Werner dedicaron una atención preponderante a la génesis de los yacimientos minerales. Pero ambos han influído notablemente en las investigaciones ulteriores sobre esta cuestión, a través de sus respectivas concepciones sobre la evolución de la corteza terrestre y los fenómenos que en ella, o sobre ella se desarrollan. Las investigaciones ulteriores han permitido superar los abruptos antagonismos del tiempo de aquellas polémicas (13). Hoy día se puede considerar como definitivamente probado que bastantes yacimientos se han formado a elevadas temperaturas, algunos de ellos, incluso mediante fenómenos de segregación magmática que recuerdan en ciertos aspectos los procesos evocados por Hutton de modo demasiado generalizado. E igualmente seguro es que otros yacimientos tienen un origen sedimentario marino que encajaría mejor en las concepciones wernerianas.

No es menos cierto, sin embargo, que muchos yacimientos de diversos tipos fueron atribuídos prematuramente a un origen más o menos afín a los primeros, y una revisión crítica a la luz de métodos rigurosos muestra que su origen es sedimentario.

Pero más que en el dilema ígneo-sedimentario, el aspecto más importante de la cuestión es el de que los investigadores más influídos por el plutonismo, han tendido, más fácilmente, a disociar la génesis de los minerales del yacimiento con respecto a la de la roca encajante. A disociarla en el tiempo, y en el espacio.

En efecto, en muchos casos, la de las rocas aparecía claramente que se debía a procesos sedimentarios, mientras que para la de los minerales del yacimiento se admitía, de modo axiomático, en la mayoría de los casos, su relación con procesos magmáticos, de alta temperatura. Con tales premisas, la coexistencia actual de la roca y los minerales del yacimiento, no podía ser explicada más que por un proceso "epigénico" y "exógeno". Es decir, que el yacimiento se habría formado con *posterioridad* a la roca, y mediante introducción de ma-

(13).—La herencia de Hutton y de Werner en la Geología moderna está breve y particularmente bien presentada en un artículo de WEGMANN (1958).

teria procedente de *fuera*; en general, desde zonas *profundas* de la corteza terrestre.

Si se tiene en cuenta la tendencia a la que alude AMSTUTZ (1959, etcétera), y a la que me he referido anteriormente, según la cual la mente humana admite fácilmente esos recursos a lo que parece menos corriente, menos cercano, cuando se trata de explicar el origen de cosas y fenómenos que considere más extraordinarios, se comprenderá aún mejor el éxito y la sobrevaloración del “epigenetismo” y del “exogenetismo”, dentro del campo de las investigaciones sobre los yacimientos minerales (14).

GEOLOGIA Y GEOGNOSIA

Como es inevitable, los planteamientos teóricos defectuosos repercuten en la mengua del valor de las aplicaciones de una Ciencia y en una restricción del campo de las mismas. La prospección de yacimientos minerales requiere necesariamente, para ser orientada de modo racional, un conocimiento lo más exacto posible de la génesis de aquéllos. Las interpretaciones erróneas desorientarán, o, por lo menos, no ayudarán positivamente al éxito.

Ahí está sin duda una de las causas del retraso, que indiqué al principio, de la generalización de la aplicación de la Geología a la prospección. Singularmente, a la de minerales metálicos, pues los errores han sido mucho más importantes en este dominio.

A esa causa se añadió pronto otra, de modo también prácticamente inevitable. No es totalmente independiente de la anterior.

Como toda ciencia, en el curso de su desarrollo histórico la Geología ha experimentado una creciente diversificación de especializa-

(14).—PRUVOST (1951) pone de relieve los riesgos de las hipótesis geológicas, debidos a la facilidad con que pueden admitirse los factores fuera de posible medición. Ello hace de la Geología un terreno menos propicio que el de otras Ciencias, para substraerse a la tendencia referida.

ciones. Así, la Mineralogía, la Petrología, más tarde la Geoquímica, se han individualizado como ciencias autónomas que tienen por objeto los minerales, las rocas, la distribución y migraciones de los elementos químicos en la corteza terrestre. Por otro lado, la Geología Estructural, la Geomorfología, las Geodinámicas, interna y externa, etcétera, se ocupan de la estructura de la corteza, de su relieve, de los fenómenos que originan una y otro. Y podríamos seguir enumerando aún otras especialidades que de la misma manera son ya ciencias autónomas en mayor o menor grado, como las citadas expresamente. La complejidad del objeto —la corteza terrestre—, la diversidad de métodos necesarios para su estudio, explican perfectamente el proceso en cuestión, de modo análogo a lo que ha ocurrido en otras ciencias.

Ahora bien, la investigación de los yacimientos minerales se ha encontrado en una posición singularmente incómoda. Evidentemente, los minerales son el objeto de la Mineralogía. Pero el yacimiento no consiste sólo en los minerales: son los minerales *y su circunstancia*, podríamos decir recordando la expresión famosa de Ortega. Y esa *circunstancia* consiste en: la roca encajante; la fractura u otro dispositivo estructural que pudo influir en el proceso genético; la historia geológica regional; las variaciones en el nivel freático; en fin, una gran variedad de factores. No todos ellos, ciertamente, han influido en todos y cada uno de los yacimientos minerales. Pero en cualquier caso, el “estado actual” de un yacimiento es el resultado de la acción de factores diversos, desarrollada en bastantes ocasiones en varias etapas a lo largo del tiempo.

El esclarecimiento de esa historia, de esa génesis, requiere inevitablemente el previo conocimiento de datos correspondientes a distintas especialidades, y no sólo de la Mineralogía. No puede pretenderse, por otra parte, que el mineralogista deba ocuparse por sí mismo de esas otras investigaciones, en el campo de la Estratigrafía, de la Geología Estructural, o de las que sean, entre las especialidades cuyo concurso se requiera en cada caso. Y —se debe insistir en ello— el estudio mineralógico más completo, aún llevado a cabo con las téc-

nicas más rigurosas, no basta en modo alguno para dilucidar más que unos aspectos de la génesis, de la posible evolución o transformaciones, del yacimiento. Por importantes que sean —y ordinariamente lo serán mucho— tales aspectos no bastarán, en modo alguno, sin el concurso y la investigación de todos los demás datos que podrán proporcionar otras especialidades.

El desarrollo histórico de la Geología muestra que, en general, esa integración de conocimientos ha sido bastante precaria. En todo el siglo XIX y en lo que va del XX, la Mineralogía y, en general, la Petrología también, han sido cultivadas con excesiva independencia de las demás ciencias geológicas. En bastantes cátedras e Institutos de Mineralogía, el mineral ha sido visto poco más que como ente desligado de su "contexto" en la corteza terrestre, del que con la investigación rigurosa de su composición —más tarde también de su estructura cristalina— y de sus propiedades físicas, se agotaban las posibilidades de estudio. Es la perspectiva que al químico bastaría, pero que para el geólogo resulta insuficiente.

Por otro lado, los especialistas de las ramas que implican un contacto más inmediato con el terreno, han carecido con demasiada frecuencia de una preparación adecuada en Física, Química y hasta en Mineralogía, por lo cual tampoco estaban preparados para una correcta interpretación de la génesis de los yacimientos.

Únicamente la colaboración entre especialistas de diversas ramas, y el trabajo de equipo convenientemente dirigido, pueden salvar las dificultades y riesgos de la creciente especialización. Ahora bien, en general, hasta tiempos recientes, tal tipo de trabajos ha sido poco frecuente en el campo de las investigaciones sobre yacimientos minerales.

A esa división, o contraposición, de una "Geognosia" y una "Geología", le corresponde sin duda una parte considerable del retraso repetidamente aludido. No se trata, ahora, de una crítica, ni de expresar retrospectivamente juicios de valor. Simplemente, de una toma de conciencia de un hecho, que lo más probablemente ha sido inevitable, y que una vez más puede ilustrar como el desarrollo de

la Ciencia no es uniforme ni avanza a modo de ondas concéntricas cada vez más extendidas. Parece ineludible que queden campos un tanto abandonados, o parcialmente cubiertos por una maleza de errores, entre otros en los que se consiguen avances más rápidos y firmes.

En el caso que nos ocupa, la disociación antes mencionada entre el yacimiento mineral, por una parte, y la roca encajante, por otra, a la que conduce la generalización de las interpretaciones epigenetistas-exogenetistas, ha contribuido —y a su vez se ha visto favorecida por ella— a la división y distanciamiento de los campos que, con alguna inexactitud, llamamos de la Geognosia y de la Geología *s. str.*

LA INDIVIDUALIZACION DE LA METALOGENIA

En los tiempos posteriores a Werner y Hutton, a lo largo del siglo XIX, la investigación geológica de los yacimientos minerales se fué incrementando gradualmente, y el repertorio de ideas sobre su génesis se enriqueció con otras nuevas.

Para los epígonos de los fundadores de la Geología, los procesos en cuestión eran esencialmente tres: génesis de yacimientos por intrusión de materiales fundidos (proceso que tenía la preferencia de Hutton); formación de filones por acción de las aguas en el interior de la corteza terrestre (ya invocado por Agricola); y procesos sedimentarios (predilectos de la escuela de Werner).

En el segundo tercio del siglo, especialmente, aparecen nuevas hipótesis y teorías que invocan procesos genéticos diferentes, y se introducen modificaciones y nuevos matices a las hipótesis y teorías preexistentes. Me limitaré a señalar sólo unos cuantos hitos en ese camino.

Daubrée fué una personalidad singularmente interesante, que puede considerarse como el precursor en el empleo del método experimental en diversos campos de la Geología. En el de la Minera-

logía logró, por ejemplo, la síntesis de la casiterita mediante la reacción de vapores de cloruro estannoso y de agua. Con ello se afianzaba la interpretación de un origen pneumatolítico (es decir, debido a la sublimación, a partir de gases y vapores procedentes del interior de la Tierra), para ciertos yacimientos, el cual hasta entonces había sido sólo presentido. El mismo Daubrée insistió también sobre la importancia de los procesos desarrollados de las aguas de origen superficial, progresivamente calentadas en el curso de su infiltración por el interior de la corteza. Eran las ideas de Agricola, aunque remozadas, y mejor matizadas gracias a la extensión de los conocimientos.

A mediados de siglo, Elie de Beaumont insiste sobre el papel importante del vapor de agua, en la formación de muchos yacimientos filonianos. En cambio, restringe la que se concedía a los fenómenos de segregación magmática, y que una aplicación demasiado literal de las ideas de Hutton había exagerado.

Aunque por las razones antes indicadas, todo conducía a una más fácil aceptación del epigenetismo y, en efecto, éste dominaba en general, su dominio era menos absoluto de lo que fué más tarde. En parte, ésto puede atribuirse a la precariedad de muchos datos, a la insuficiencia de observaciones, y más aún, a la de los métodos. Ante los yacimientos minerales, muchos de los geólogos de aquel tiempo se limitan a una posición prudente, que no pasa de la descripción de los hechos de observación con los métodos a su alcance. Y, todo lo más, se hace alguna rápida alusión, sin hacer demasiado hincapié, en las interpretaciones vigentes, generalmente epigenetistas, desde luego.

Es interesante señalar que ya a mediados del siglo XIX aparecen unas tentativas de llegar a una mayor objetividad, de estudiar y clasificar los yacimientos según bases no genéticas, no comprometidas con ideas apriorísticas. Son especialmente von Cotta y von Groddeck los exponentes de este nuevo planteamiento.

Estos autores atienden en primer lugar a criterios geométricos, más fácilmente libres de apreciaciones subjetivas, para la clasificación de los yacimientos. Y—lo que merece subrayarse— se atiende igual-

mente a las características geométricas de la masa del yacimiento propiamente dicho, que a las de la roca encajante. De su comparación, deducen conclusiones sobre la génesis contemporánea o no, de uno y otra. De modo imperfecto e implícito se encuentra ya una cierta prefiguración del concepto de “congruencia”, que tanto valor tiene en las investigaciones modernas.

No obstante esos intentos, la mayoría de los autores siguió prestando escasa atención a esos criterios, y el estudio de la mayoría de los yacimientos de menas metálicas continuó haciéndose con excesiva independencia del de las rocas encajantes, y del de la Geología Regional. En cambio, por razones obvias, las investigaciones correspondientes a las de carbones minerales, y a otros cuyo origen sedimentario se hacía patente, sí atendían mejor tales aspectos.

Más avanzado el siglo, Sandberger propone la teoría llamada de la “secreción lateral”, de la cual existían ya algunos antecedentes. Explicaba la formación de los yacimientos filonianos por la acción de las aguas de infiltración superficial, que habían disuelto sustancias de las propias rocas encajantes del filón. Esta teoría fué impugnada fuertemente por Posepny, De Launay y otros autores, que demostraron que tales fenómenos no podían tener más que una importancia relativamente pequeña, pero en su momento obtuvo una amplia audiencia.

Los últimos autores citados dieron nuevo vigor a las teorías según las cuales las soluciones hidrotermales habían tenido un papel de primer orden en la génesis de yacimientos de minerales metálicos. Además, para dichos autores, esas aguas procedían, sobre todo, de procesos que, en definitiva, pueden llamarse de diferenciación magmática. No obstante, Daubrée, y luego Van Hise, insistieron en la mayor contribución de las aguas de origen superficial.

Conviene indicar que hacia los años de la transición del siglo XIX al XX comienza, sobre todo las investigaciones de Vogt, la aplicación en notable escala de los principios de Química Física a la interpretación de los procesos mineralogénicos de los yacimientos de menas metálicas.

Con todo ello, en la época últimamente señalada los conocimientos sobre yacimientos van llevando a la diferenciación de una ciencia autónoma. De Launay por primera vez le da nombre: Metalogenia. Como es obvio, esta denominación es objetable, pero hoy por hoy, no se han encontrado substitutivos mejores en las lenguas latinas.

Se llega así a la constitución de esa rama autónoma en pleno apogeo del epigenetismo. Aunque se reconoce que los procesos de formación de yacimientos minerales son diversos, la importancia mayor fué dada a los correspondientes a la acción de flúidos (gases y vapores, y soluciones hidrotermales) procedentes de focos magmáticos, circulantes en el interior de la corteza terrestre. Esos flúidos habrían originado —mediante procesos de sublimación, de precipitación química, o de coagulación de coloides— el relleno de grietas, fracturas o poros de las rocas de la corteza. Igualmente, al actuar sobre rocas especialmente vulnerables por la acción química de tales flúidos, se podía llegar a su sustitución en gran escala con los nuevos minerales; es decir, el proceso llamado de metasomatismo. Y todo ello podía ocurrir hasta a muy grandes distancias del real o supuesto foco magmático.

En definitiva se ponía el acento principal en los procesos pneumatolíticos y, sobre todo, hidrotermales. Aunque los demás procesos —segregación magmática; sedimentarios, en sus diversas modalidades, mecánica, química, etc.— eran conocidos, su papel queda restringido a los casos en los que con toda evidencia se imponían de modo inmediato.

En las primeras décadas del siglo actual la situación, por lo que se refiere a la interpretación, no varió sensiblemente, y se mantuvo afianzada la hegemonía del epigenetismo en las interpretaciones.

En esa época se ha avanzado enormemente en el mejor conocimiento de muchos hechos y procesos, que la obligada brevedad de estas páginas impiden reseñar. Entre ellos, por ejemplo, los procesos secundarios de oxidación y cementación de los yacimientos de sulfuros, los cuales repercuten en gran escala en la formación de zonas

enriquecidas, especialmente apetecibles desde el punto de vista económico.

A todos esos progresos ha contribuído muy especialmente la madurez alcanzada ya por la Química desde varios decenios antes, y la Química Física, así como la aplicación de conocimientos de otros campos del saber. Sin embargo, en muchos casos, y por efecto del referido distanciamiento de las investigaciones en otras especialidades de la Geología, no se llegó al límite de las posibilidades.

A pesar de los planteamientos parcialmente defectuosos, que con frecuencia tenían las investigaciones sobre yacimientos minerales, poco a poco la Geología comenzó a conquistar posiciones en la prospección minera.

Y es que, por lo general, aunque el problema fundamental —el de la génesis— fuese mal planteado, las observaciones detalladas sobre yacimientos se fueron multiplicando. Con ellas, se fueron advirtiendo correlaciones que —fuesen o no correctamente interpretadas— en muchos casos facilitaban útiles criterios para la prospección. Hasta cierto punto, se trataba de un empirismo todavía; pero estaba basado en observaciones más rigurosas, efectuadas por geólogos, menos propensos que el vulgo a los errores o a los descuidos más graves. En el fondo, con respecto al empirismo de los siglos anteriores, había por lo menos las diferencias que han existido —antes del moderno progreso de la Fisiología, de la Farmacología, y demás ciencias básicas —entre el empirismo que tenía todavía un papel tan importante en la Medicina propiamente dicha, practicada por sus profesionales, y el seguido por los intrusos.

A ésto hay que añadir también otro factor: la difusión de conocimientos alcanzada gracias a las revistas de Geología, y pronto también a las dedicadas especialmente a yacimientos minerales. Antes inexistentes, fueron facilitando datos procedentes de todas las partes del mundo. Y aún cuando así —como es inevitable— se difunden errores también, el resultado final tiene un balance netamente positivo. La complejidad de la corteza terrestre es grande, la variedad de tipos de yacimientos lo es también, y un geólogo, personalmente,

solo alcanzará el conocimiento directo de un limitado número de hechos; el concurso de la experiencia ajena le es indispensable.

Finalmente, no hay que perder de vista que, aún con sus exageraciones, el origen epigenético-exogenético es cierto para muchos yacimientos, y en estos casos la interpretación dada a su génesis no puede sino afianzar mejor las bases para una prospección racional.

LA CRISIS

En estos últimos años se asiste a una verdadera crisis en la Geología de los yacimientos minerales. Interpretaciones hasta ahora admitidas casi sin discusión, y que parecían consagradas por su reiterada inserción en los manuales y tratados; los principios de las clasificaciones; hasta conceptos básicos, son objeto de revisión y de discusión en los congresos y reuniones científicas, y en los artículos de las revistas especializadas. De todo ello se podría no ver más que los inconvenientes y una impresión de confusión; pero, a la vez, es una situación que tiene especiales incentivos a los investigadores con vocación y mentalidad creadoras.

Falta la necesaria perspectiva para presentar debidamente los orígenes y el desarrollo de esta crisis. Es interesante notar que es contemporánea, aunque ligeramente retrasada, de la que se observa en el dominio de la Petrología de rocas ígneas y metamórficas.

Y, fuera del ámbito de las ciencias geológicas, en otras manifestaciones del espíritu humano encontraríamos semejanzas mayores de lo que un examen superficial parece mostrar. En la Filosofía, en la Teología, en la Sociología, en la Historia, en las artes, observamos situaciones en cierto modo comparables. Existe una avivada preocupación por separar más cuidadosamente lo que de caduco pueda haber, en los aportes de generaciones pasadas, como inevitable lastre de los distintos contextos culturales en los que tuvieron su oclusión.

Y, más concretamente, en la interpretación de realidades complejas. Se trate de la evolución histórica de la humanidad, o la de la corteza terrestre, vemos comunes preocupaciones. Entre ellas, la de eliminar en lo posible el recurso a factores lejanos, que escapen al control de la razón, de la medición, y un afán de no descuidar factores intrínsecos que puedan ya explicar los hechos, parecen tener una especial importancia.

Evidentemente, todo ello entraña el riesgo de exageraciones. Es seguro que con frecuencia se cae en ellas, pero no es menos cierto que gracias a los nuevos planteamientos se advierten facetas nuevas que antes habían escapado. El balance final será positivo, y entrañará una mayor exactitud y una ampliación de nuestros conocimientos.

Del desenlace de esta crisis cabe esperar, entre otras cosas, una concepción, mejor integrada que en el pasado, de los fenómenos mineralogénicos, en su sentido más estricto, con todos los demás desarrollados en un ámbito determinado de la corteza terrestre. Y, con ello, un notable progreso en las investigaciones sobre yacimientos, tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

Por lo que se refiere concretamente a los yacimientos minerales, los espléndidos resultados que se han conseguido y se consiguen en los campos de la Sedimentología, de la Mineralogía, de la Geoquímica y de todas las demás ramas que se dedican a otras parcelas, más elementales en cierto modo, repercuten necesariamente en un aumento de las posibilidades de observaciones y de análisis más rigurosos de los hechos. En concreto, a una mayor precisión en cuanto a las relaciones de tiempo y de espacio con respecto a las rocas encajantes, y también con respecto a los acontecimientos de la historia geológica regional.

Ante esas nuevas posibilidades, ciertos investigadores pasarán de lado. Es inevitable, pues, los métodos de trabajo, y más aún el modo de pensar, están sujetos a una inercia. Pero otros se aprove-

chan de aquéllas (15) y se van percatando de modo más claro del hecho fundamental: la interrelación de la génesis de yacimientos con otros fenómenos más o menos variados, desarrollados en un cierto ámbito de la corteza terrestre en un lapso de tiempo determinado. Y de que no basta con determinar cual es el proceso fisicoquímico que puede haber dado como resultado una determinada asociación mineral; el yacimiento es ésta, pero no sólo ésta, sino también su "circunstancia", como antes he indicado.

Pues bien, esa "circunstancia" es lo que ha podido ser cada vez mejor conocido, gracias a los progresos realizados en campos diversos de la Geología. A ella los investigadores —pocos al principio: los precursores, los inconformistas— y luego progresivamente un creciente número, irán atendiendo debidamente.

Al examinar con esas nuevas perspectivas los yacimientos minerales, diversos autores han llegado a la conclusión de que la génesis de muchos de ellos puede explicarse perfectamente sin hacer apelación a la distinción de dos etapas, hasta ahora casi inevitable: la de la formación de la roca actualmente encajante, primero; la del mineral o minerales que constituye el yacimiento, después. E, igualmente, ven que tampoco es necesario invocar a fuentes más o menos lejanas, de las que llegarían las substancias que han dado lugar al mineral o minerales en cuestión.

Por de pronto, se advierte una atención, muchísimo mayor que en el pasado, hacia el medio sedimentario marino (16).

Las modernas investigaciones sedimentológicas, y de Geología Marina propiamente dicha, muestran que este medio es mucho más

(15).—Se pueden encontrar fácilmente analogías en otros campos del saber. Como por ejemplo, el progreso de la filología, o en el conocimiento de los géneros literarios permite una exégesis mucho más rigurosa de los textos sagrados y, en consecuencia, es Teología establecida sobre bases más sólidas. También, como un mejor conocimiento de los hechos de la Economía, permite comprender mejor el porqué de ciertos grandes acontecimientos de la Historia, sin necesidad de caer, tampoco, en los riesgos de nuevas explicaciones demasiado unilaterales, no por nuevas menos defectuosas que los antiguos en vías de superación.

(16).—Se pueden citar, como ejemplos representativos de esta nueva valoración, las obras que se refieren, de AMSTUTZ (1959), PELISSONIER (1961), ROUTHIER (1963).

diversificado de lo que antes, un poco precipitadamente, se suponía. La Geoquímica, por su parte, pone de relieve que, aunque en cantidades desde luego extremadamente diferentes, el agua del mar contiene todos los elementos químicos, los cuales, en condiciones adecuadas, podrán originar minerales propios que se depositarán en el fondo. Todo dependerá de si el pH, las concentraciones, etc., son o no apropiadas para ello. Ahora bien, a favor de la compartimentación, de la repercusión de climas apropiados, de la acción de organismos, pueden darse en ciertos ámbitos esas condiciones más o menos especiales.

La Sedimentología actual muestra ya ejemplos bien probados de la génesis, en medio marino, de minerales que antes se suponían formados solamente en condiciones intracorticales, y a temperaturas más o menos altas.

Sin atentar a la validez general del principio de las causas actuales, es cierto que la época actual tiene algunos aspectos un poco excepcionales: gran profundidad de la mayor parte de los ámbitos oceánicos; relieve terrestre muy contrastado; gran diversidad climática. En otras épocas geológicas no ha sido así.

Por ejemplo, es ya seguro que en el período triásico un mar de muy escasa profundidad cubría enormes extensiones y estaba rodeado de tierras peneplanizadas, en las que reinaban climas mucho menos variados que los que encontramos en la actualidad en las diversas regiones de la Tierra. En el fondo de ese mar de aguas tan someras, bastaban leves movimientos de la corteza para que quedaran individualizadas cuencas parciales, en las que podía llegarse con cierta facilidad a condiciones propicias para el depósito de substancias diversas, y no solo las sales corrientes. Los efectos de la evaporación, de los cambios de pH y de rH en función de la descomposición de la materia orgánica y de las diversas posibilidades de aireación de las aguas, pueden explicar la formación de muchos minerales que antes se interpretaban como resultado de acciones hidrotermales u otras, desarrolladas en una época netamente posterior a la de la formación de la roca. Actualmente, bastantes autores suponen que

muchos de los yacimientos "estratoides" de menas de plomo, de cinc, y otros metales tienen ese origen singenético-sedimentario. Y es de notar que en las regiones circunmediterráneas, tales yacimientos estratoides son particularmente frecuentes —y localmente importantes— en los terrenos triásicos (17).

También los fenómenos volcánicos son objeto de especial atención. Se concede una importancia cada vez mayor al papel del volcanismo —especialmente al desarrollado en medio submarino— en la génesis de yacimientos minerales. Los flúidos volcánicos, al acceder al medio marino, originan variados procesos mineralogénicos: mediante reacciones con los materiales de los sedimentos del fondo; o en virtud de otros procesos. Resultado de todos ellos es la formación de yacimientos —en ocasiones, enormes— de minerales diversos. Uno de los ejemplos más llamativos es precisamente el de los de piritas del SW. de la Península: Río-Tinto, Tharsis, Santo Domingo, etc. (18).

Igualmente, se ha llegado a la conclusión de que la acción de los organismos ha sido más importante de lo que se suponía, en la génesis de ciertos tipos de yacimientos de minerales de hierro y otros. En fin, los avances en el conocimiento de los procesos de sedimentación, volcánicos, etc., logrados en las últimas décadas, han ensanchado notablemente los horizontes. Y, con la progresiva superación de la reiteradamente referida tendencia a la fácil admisión de causas más o menos remotas e inaccesibles a su verificación, la investigación de los yacimientos comienza a entrar en una etapa de mayor madurez. De ella se puede esperar una mayor eficacia en el campo de las aplicaciones a la prospección.

(17).—En España están especialmente bien representados en la zona bética propiamente dicha: sierras de Lújar, de Gádor, Alhamilla, de Baza, etc.

(18).—Los recientes estudios de WILLIAMS (1961) y de KINKEL (1961), demuestran claramente esta interpretación. Durante más de un siglo habían sido propuestas todas las interpretaciones en boga para explicar la génesis de esos yacimientos, sin poder evitar, naturalmente, contradicciones con los hechos observados. El papel importantísimo del volcanismo submarino ha sido subrayado en los años últimos. Como trabajos especialmente representativos a este respecto se pueden citar especialmente los de AMSTUTZ (1959), BERNAUER (1939), BORCHERT (1960).

Una de las características principales que se advierte en esta etapa que estamos comenzando a recorrer es, sin duda, el de la valoración de los procesos singenéticos en la génesis de yacimientos minerales. Y esa valoración influye inevitablemente en la orientación de las prospecciones de yacimientos de muchos tipos, que antes se suponía eran epigenéticos.

Otra de esas características —no menos importante— es la conexión, mucho más íntima que lo había sido nunca hasta ahora, entre las investigaciones de todos los aspectos geológicos necesarios para la correcta interpretación de la génesis y de la evolución de los yacimientos. Cada vez se percibe más claramente, y por un creciente número de investigadores, que tal génesis, tal evolución ulterior, no pueden ser bien comprendidas si se prescinde del contexto en el que se han desarrollado los fenómenos correspondientes. Es decir, de su ámbito dentro de la corteza terrestre, ámbito más o menos extenso, del cual interesa conocer, lo más exacta y completamente posible, su constitución litológica, su estructura, su historia geológica, y aún otros aspectos más, según los casos. Cuánto mejor se logren esos objetivos, tanto más probable será llegar a las interpretaciones seguras. No solamente por lo que atañe a la génesis de los yacimientos, sino sobre otros varios aspectos importantes para su evaluación económica (19).

(19).—La diversidad de métodos correspondientes a las Ciencias geológicas que, de modo más o menos importante, contribuyen a esas investigaciones, es muy grande. Actualmente, además de los imprescindibles en todos los casos (cartografía geológica, óptica mineralógica, análisis químicos), según las características propias de la región y las de los yacimientos que se estudien o se traten de descubrir, se emplean además variadas técnicas: difracción de rayos X, decrepitometría, análisis de isótopos, granulometría, determinaciones paleontológicas, etc., cuya enumeración completa sería larga. Capítulo aparte merecerían los métodos geofísicos y los geoquímicos aplicados a la prospección de yacimientos. Su aplicación es extraordinariamente útil en bastantes casos. Estos métodos no suplantán a los geológicos, sino que se complementan mutuamente, de modo que su empleo bien coordinado redundará casi siempre en unas conclusiones mucho más seguras que las que se habrían obtenido mediante unos u otros métodos exclusivamente. De todos modos, la exclusividad de estos últimos apenas se da, pues la interpretación de las mediciones geofísicas requiere necesariamente de un conocimiento adecuado de las características geológicas de la región objeto de estudio, y lo mismo cabe decir sobre los métodos geoquímicos.

Esto, en lo que se refiere a yacimientos ya localizados. De modo análogo, la prospección de nuevos yacimientos minerales en una región determinada obtendrá resultados y conclusiones tanto más seguros, cuanto mejor se conozcan todas aquellas características geológicas.

A MODO DE CONCLUSION

A lo largo de esta exposición —demasiado larga y prolija, por efecto de mis propias limitaciones— he tratado de mostrar como el progreso de la Geología ha dotado a la prospección de yacimientos minerales de apoyos más firmes. Es decir, de conocimientos, mediante cuya aplicación, ha dejado de ser una actividad puramente empírica para devenir una Técnica con base científica cada vez más extensa y firme.

Ahora bien, el desarrollo de esas aplicaciones ha encontrado dificultades en su camino. Entre ellas, me ha parecido útil poner de relieve las debidas a dos causas: la falta de una suficiente integración de conocimientos geológicos de diversas especialidades; y las originadas por la pertinencia de ciertas tendencias muy arraigadas en el espíritu humano, y sobre las cuales sería superfluo volver a tratar aquí.

En la época actual asistimos a una verdadera crisis, en la cual se advierten errores numerosos e importantes en los antiguos planteamientos, y en las interpretaciones, debidas a dichas causas. Y se llega a una más clara percepción de estas últimas.

Con ello se bosquejan de modo bastante bien definido nuevas orientaciones, que son seguidas ya por los investigadores y equipos de vanguardia.

Los yacimientos minerales se presentan así, en la corteza terrestre, como concentraciones en cierto modo excepcionales, de determi-

nados elementos químicos ordinariamente mucho más dispersos (20). Como manifestaciones, más o menos extremadas, podría decirse, de la diferenciación geoquímica que la corteza terrestre, lentamente —y no sin retrocesos parciales en tales o cuales puntos de la misma— va logrando. A esa diferenciación han contribuído variados procesos: magmáticos, sedimentarios, también otros llevados a cabo por los organismos (21).

Resulta claro que, cuanto mejor conozcamos esos distintos procesos, en tanto mejores condiciones estaremos para explicarnos la génesis de los minerales en cuestión. Pero no basta con ello.

En efecto, dichos procesos no se desarrollan en pequeños sistemas cerrados, ni de modo aislado con respecto a numerosos fenómenos de muy diversa naturaleza, que se desarrollan en el seno de la corteza terrestre, encima de la misma y, también, por parte de los seres vivos. Por el contrario, existen interrelaciones e interacciones múltiples y variadas entre ellas.

No siempre, ni mucho menos los yacimientos minerales, son identificables y se pueden localizar con facilidad. Ahora bien, dadas esas interrelaciones antes aludidas, las huellas dejadas por fenómenos geológicos variados, a veces aparentemente desligados de los procesos que originaron los yacimientos permitirán orientarnos en esa localización, y también hacia el mejor conocimiento de sus características.

Todo ello exige una más perfecta integración de conocimientos. Por la diversidad de éstos, y la de los métodos a emplear, no puede

(20).—No en todos los casos es así. Puede hablarse propiamente de yacimientos de ciertos minerales, tales como la sillimanita, granates, de bentonita, y aún otras substancias, en los que los elementos químicos no se presentan en concentraciones que puedan ser calificadas como excepcionales. En estos casos, el material en cuestión se emplea, no por los elementos en sí, sino por las especiales cualidades físicas u otras que su estructura cristalina les da.

(21).—El papel de estos últimos es sumamente “eficaz” desde el punto de vista de la diferenciación geoquímica. Baste recordar las elevadas concentraciones de ciertos elementos químicos escasos y dispersos en el reino mineral —el fósforo por ejemplo— que pueden originar. Y también, conviene recordar aquí su importantísima labor en el almacenamiento de energía solar, en forma de carbón, de petróleo.

ya ser una labor puramente individual. Sólo la colaboración de especialistas de las diversas ramas de la Geología —y, en su caso, de otras ciencias (Geofísica, etc.)— podrá asegurar en lo posible la consecución de los objetivos propuestos. Y, en definitiva, las mejores garantías para la prospección.

De esa manera, la Geología de los Yacimientos —o Metalogenia, si queremos utilizar esa denominación— parece esfumarse un tanto, como ciencia autónoma. Si quiere preservar una cierta unidad metodológica, se convierte en un grupo de capítulos de Mineralogénesis, es decir, pasa dentro del campo de la Mineralogía propiamente dicha. Pero entonces, al estudio aislado de tales procesos conduce frecuentemente —como reiteradamente ha podido comprobarse— a interpretaciones genéticas erróneas o, por lo menos, incompletas y que son poco útiles a los fines de la prospección. Si, en cambio, se quiere atender a todos los factores de esa génesis, la diversidad metodológica es demasiado grande, y se pierde la unidad; se pasa entonces a una especie de compilación de conocimientos correspondientes a diversas ramas o ciencias geológicas.

En la situación actual —que indudablemente variará, según direcciones todavía difíciles de prever— vemos que si el estudio de los yacimientos exige esa colaboración más o menos numerosa. Ahora bien, de entre todos los conocimientos y métodos a poner en juego, hay dos aspectos de la investigación que tienen en todos los casos una fundamental importancia: la cartografía geológica, por una parte; el estudio de las muestras desde el punto de vista mineralógico —importantísimo siempre,— petrológico, sedimentológico, químico, etc. —de importancia relativa más variable, según los casos— por otra. Pues, entre la cartografía geológica —que implica la representación e interpretación de la región correspondiente, desde el punto de vista estratigráfico, tectónico, etc.— y los otros estudios acabados de aludir, se podrá llegar a una visión sintética, más o menos completa, según las condiciones de observación, y el grado de complejidad de la porción de la corteza terrestre que interese. Visión sintética en el tiempo y en el espacio, de disposición actual de los materiales que

la constituyen, y de evolución a lo largo de una historia más o menos larga y complicada.

Con todas sus imperfecciones, y sus oscuridades, esa síntesis de conocimientos constituye ya el mejor instrumento, siempre en vías de perfeccionamiento, con el cual se puede intentar prever la eventual existencia, de yacimientos minerales en una región determinada, sus características, y su más verosímil localización. E, igualmente, en el caso de tratarse de yacimientos ya conocidos, puede contribuir a su mejor aprovechamiento y su más adecuada explotación.

Y así, la Geología contribuye también a afianzar el dominio de la Naturaleza por el hombre, que ya se preceptúa desde una de las primeras páginas del Génesis.

B I B L I O G R A F I A

- ADAMS, F. D. (1954).—The birth and development of the geological sciences. v + 506 pp., 79 fig. Nueva York (Dover Publ. Inc.).
- AMSTUTZ, G. C. (1957).—"Granitisation" und Minerallagerstätten. *N. Jb. Mineral., Monatsh.*, t. 32, pp. 1-12.
- — (1959).—Syngene und Epigene in Petrographie und Lagerstättenkunde. *Schweiz Min. Petr. Mitt.* t. 39, pp. 1-84.
- — (1960).—Some basic concepts and thoughts on the space-time-analysis of rocks and mineral deposits in orogenic belts. *Geol. Rdsch.*, t. 50, pp. 165-189.
- — (1962).—L'origine des gites minéraux concordants dans les roches sédimentaires. *Chr. d. Min.* n.º 308, pp. 115-126, 5 fig.
- — (1964).—Introduction (*in* Sedimentology and Ore Genesis). *Developments Sedimentology*, vol. 2, pp. 1-7, 2 fig. Amsterdam (Elsevier Publ. Co.).
- BEMMELEN, R. W. van (1960).—Die Methoden in der Geologie. *Mitt. Geol. Ges. Wien*, t. 53, pp. 33-52, 1 fig.
- — (1961).—The scientific character of Geology. *J. of Geol.*, vol. 69, pp. 453-463, 2 fig.

- BERNAUER, F. (1934 y 1939).—Rezente Erzbildung auf der Insel Vulcano. 1.^a parte, *N. Jb. Mineral. Beil. Bd.*, t. 69, pp. 60-91; 2.^a parte, *id. id.*, t. 75, pp. 54-71.
- BORCHERT, H. (1960).—Geosynclinale Lagerstätten, was dazu gehört und was nicht dazu gehört, sowie deren Beziehungen zu Geotektonik und Magmatismus. *Freib. Forschungshefte*, n.º C 79, pp. 7-61.
- BOWEN, N. L. (1928).—The evolution of igneous rocks. xviii + 334 pp., 82 fig. Princeton Univ. Press.
- BUBNOFF, S. von (1954).—Grundprobleme der Geologie. vii + 234 pp., 60 fig. Berlín (Akad. Verlag).
- DON LEET, L. y LEET, F. J. (ed.) (1961).—The world of Geology. ix + 262 pp. Nueva York (Mc Graw-Hill).
- FISCHER, W. (1961).—Gesteins und Lagerstättenbildung im Wandel der wissenschaftlichen Anschauung. viii + 592 pp., 12 fig., xii lám. Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verl.).
- GARRELS, R. M. (1960).—Mineral Equilibria: at low temperature and pressure. 254 pp. Nueva York (Harper).
- GEIKIE, A. (1962).—The founders of Geology (reimpr. de la 2.^a ed., de 1905). xi + 486 pp. Nueva York (Dover Publ. Inc.).
- GIGNOUX, M. (1951).—Le rôle joué par les sciences de la Terre dans nos représentations de la matière. *XV Congr. Int. Phil. Sc.*, vol. VII, pp. 123-129.
- GINSBURG, R. N. (1957).—Early diagenesis and lithification of shallow-water carbonate sediments in South Florida. *Soc. Econ. Pal. and Min. Sp. Publ.* n.º 5, pp. 80-100.

- GLANGEAUD, L. (1951).—Epistémologie des Sciences naturelles et structure du réel. *XV Congr. Int. Phil. Sc.*, vol. I, pp. 127-139.
- — (1960).—Vers une solution des grands problèmes géologiques grâce aux nouvelles synthèses géodynamiques. *in Encyclopedie Française* t. III, pp. 25-56, 17 fig. París.
- GOGUEL, J. (1951).—La Géologie, science naturelle ou science physique? *XV Congr. Int. Phil. Sc.*, vol. VII, pp. 7-15.
- — (1959).—Préface. *Encycl. de la Pléiade*, vol. VIII, pp. vii-xx. París (Gallimard).
- HÖLDER, H. (1960).—Geologie und Paläontologie in Texten und ihrer Geschichte. xviii + 566 pp., 50 fig., xvi lám. Munich/Friburgo (Karl Alber Verl.).
- JENSEN, M. L. (1959).—Sulfur isotopes and hydrothermal mineral deposits. *Econ. Geol.* t. 54, pp. 374-394.
- KARL, F. (1953).—Anwendung gefüganalytischer Arbeitsmethoden am Beispiel eines Bergbaues (Kupferbergbau Mitterberg, Salzburg). *N. Jb. Miner. Abh.*, t. 85, pp. 203-246.
- KINKEL, A. R. (1961).—Observations on the pyrite deposits of the Huelva district, Spain, and their relation to volcanism. *Econ. Geol.*, vol. 57, pp. 1071-1080, 2 fig.
- KUENDIG, E. (1959).—Eu-geosynclines as potential oil habitats. *Proceed. Fifth World Petrol. Congr., Sect. I.*
- MAC KINSTRY, H. S. (1949).—Mining Geology. 671 pp., 150 fig. Nueva York (Prentice-Hall).
- PELISSONIER, H. (1961).—La structure paléinsulaire. *Ann. Mines*, t. I, pp. 7-30, 22 fig.

— — (1962).—Classifications métallogéniques: Problèmes et essais de synthèse. *Chr. d. Min.*, n.º 306-307, 22 pp., 21 fig.

PETRASCHECK, W. E. (1955).—Grosstektonik und Erzverteilung im mediterranen Kettensystem. *Sitzungsber. d. österr. Akad. Wiss., Math.—naturwiss. Kl., Abt. I*, 164 pp. 109-130.

PRUVOST, P. (1951).—Les refuges de l'hypothèse en Géologie. *XV Congr. Int. Phil. Sc.*, vol. VII, pp. 29-39.

RAGUIN, E. (1949).—Géologie des gites minéraux. 641 pp. 145 fig. Paris (Masson).

RAMDOHR, P. (1960).—Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. 875 pp. Berlin (Akad. Verl.).

ROUTHIER, P. (1963).—Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherches. (2 tomos). 1282 pp., 411 fig., xi lám., 40 tabl. Paris (Masson).

SCHNEIDERNÖHN, H. (1952).—Genetische Lagerstättengliederung auf geotektonischer Grundlage. *N. Jb. Miner., Monatsh.* t. 27, pp. 47-89.

— — (1962).—Erzlagerstätten, xviii + 375 pp., 10 fig. 54 rat. Stuttgart (Fischer).

TEILHARD DE CHARDIN, P. (1955).—Le phénomène humain. 348 pp. Paris (Ed. du Seuil).

TURNEAURE, F. S. (1955).—Metallogenic provinces and epochs. *Econ. Geol.* 50th. Anniv. Vol., pp. 39-98.

WEGMANN, E. (1948).—Transformations métasomatiques et analyse tectonique. *Proceed. Int. Geol. Congr. XVIII Sess.*, part. III, pp. 3-10.

— — (1958).—Das Erbe Werners und Huttons. *Geologie*, t. 7, pp. 531-559.

WILLIAMS, D. (1961).—Further reflections on the origin of the porphyries and ores of Río Tinto. *Trans. Int. Met.*, vol. 71 part. 5, pp. 265-266, 2 lám.