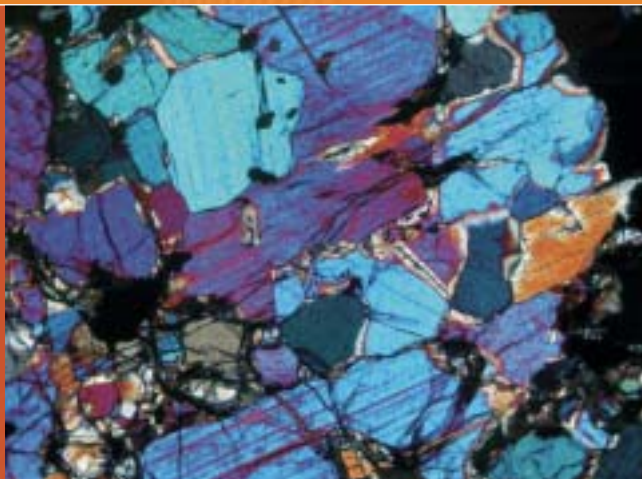


MÁSTER INTERNACIONAL
"APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE
DE LOS RECURSOS MINERALES"

MÓDULO RECURSOS MINERALES
SERIE INTRODUCTORIA

Introducción al Estudio de los Recursos Minerales

R-5



Ricardo Castroviejo Bolivar



POLITÉCNICA



Organización
de Estados
Iberoamericanos

Para la Educación,
la Ciencia
y la Cultura



Introducción al Estudio de los Recursos Minerales

Ricardo Castroviejo Bolibar



**MÁSTER INTERNACIONAL “APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS
RECURSOS MINERALES” (UE/Programa Alfa II-0459-FA)**

Red DESIR (Desarrollo Sostenible – Ingeniería – Recursos Minerales)

Coordinación: Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Prof. Ricardo Castroviejo Bolibar

ETSI Minas, Departamento de Ingeniería Geológica

C/ Alenza nº 4

28003 Madrid – España

Teléf.: +34 91 336 64 65

Autores

Miguel Llorente Isidro (m.llorente@igme.es)

Editores

Ricardo Castroviejo Bolibar (Recursos Geológicos)

José Antonio Espí Rodríguez (Medio Ambiente y Minería)

Comité Editorial

Ricardo Castroviejo Bolívar

José Antonio Espí Rodríguez

Fernando Vázquez Guzmán

Supervisión Editorial

Carlos León Altamirano

Hugo Romero Sánchez

Diseño y Montaje

Dispublic

Copyright © 2007, RED DESIR

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial sin el consentimiento de los autores.

ISBN: 84-95063-40-9

Depósito Legal:

Primera edición: Mayo 2007 (500 ejemplares)

Imprime: Gráficas Monterreina S.A.

Área Empresarial Andalucía, sector 2

28320 Pinto Madrid

“Este documento se ha realizado con la ayuda financiera de la Comunidad Europea. El contenido de este documento es responsabilidad exclusiva de la Red DESIR y en modo alguno debe considerarse que refleja la posición de la Unión Europea”

ÍNDICE

PROPÓSITO DEL LIBRO Y ORIENTACIÓN AL LECTOR	3
GENERACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES	6
DEFINICIONES	9
CLASIFICACIÓN DE YACIMIENTOS	12
YACIMIENTOS DE LA SERIE MAGMÁTICA	20
YACIMIENTOS DE LA SERIE METAMÓRFICA	33
YACIMIENTOS DE LA SERIE SEDIMENTARIA	39
SÍNTESIS SOBRE LA FORMACIÓN DE YACIMIENTOS DESDE UNA PERSPECTIVA GLOBAL	56
EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ÉPOCAS METALOGENÉTICAS	60
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y PROVINCIAS METALOGENÉTICAS	65
BIBLIOGRAFÍA	76

Propósito del libro y orientación al lector

1. PROPÓSITO DEL LIBRO Y ORIENTACIÓN AL LECTOR

Objetivo

El objetivo del presente texto es proporcionar una base común, introductoria, que asegure los conocimientos indispensables de partida a los alumnos que van a seguir el curso R5-Petrología de los Recursos Minerales. Dado que, típicamente, en un curso de estas características se encuentran asistentes de diversas procedencias y formaciones, parece útil ofrecer unas ideas introductorias y las definiciones más específicas que vayan a ser frecuentemente usadas, para evitar tanto el tener que extenderse luego en explicaciones elementales, como el que haya alguien que por dificultades terminológicas o por tener una formación específica diferente de la de la media se encuentre con dificultades de seguimiento o comprensión.

Desde un punto de vista conceptual, se ha dado preferencia a los hechos sobre las teorías. En consecuencia, el enfoque es sobre todo práctico. Por convicción arraigada y por corresponderse además con las tendencias de la investigación de los recursos minerales en el siglo XXI, se centra la atención en los procesos de concentración fundamentales, más que en descripciones detalladas de yacimientos o en las discusiones genéticas que tanta literatura producen y tanto tiempo suelen consumir. Esta atención a los procesos que determinan la aparición de concentraciones minerales de interés económico (yacimientos) aproxima el estudio de éstas al campo de la Petrología, tal como el enunciado del curso sugiere, más que al de la Mineralogía, en el que lo sitúan muchos planes de estudios y tradiciones académicas. Parece olvidarse con frecuencia que los yacimientos minerales son formaciones rocosas y como tales deben estudiarse (Petrología), independientemente de la atención pormenorizada que como tal merezca este o aquel mineral (Mineralogía).

No se trata, pues, de estudiar muchos yacimientos, sino de comprender los procesos y mecanismos por los que las sustancias minerales se concentran naturalmente en determinadas formaciones, hasta hacer de ellas yacimientos de interés económico. Y de comprender también su evolución en el tiempo y su distribución espacial. Éstas son, afortunadamente, mejor comprendidas a partir de la segunda mitad del siglo XX, gracias a las aportaciones de la Tectónica de Placas. Todo ello tiene consecuencias prácticas importantes para la investigación o exploración minera, que trata de aplicar precisamente el conocimiento del control que ejercen ciertos factores geológicos sobre los procesos de concentración. La moderna noción

de metalotecto, con su enfoque rigurosamente fáctico y por ello objetivo más que interpretativo, representa una herramienta poderosa para esta tarea. Y la elaboración de modelos, otra importante herramienta adicional, aun reconociendo sus riesgos.

Consecuentemente con estos presupuestos, el texto comienza planteando sucintamente los procesos de concentración de las sustancias de interés, concretamente de los metales, en el contexto de la evolución geoquímica del Cosmos y del Globo. Este planteamiento se concretará en el análisis de los procesos típicos de las series magmática, metamórfica y sedimentaria. Análisis que será precedido por un capítulo, a modo de recordatorio, que presenta la terminología y conceptos fundamentales a aplicar. Y por otro capítulo dedicado a la clasificación de yacimientos, que expone y justifica el esquema de tratamiento seguido. Finalmente, se plantea el análisis de la distribución espacio-temporal de los yacimientos -provincias y épocas metalogenéticas- y sus aplicaciones prácticas, es decir, su significado para exploración.

No es el objetivo de este breve texto introductorio el describir todos los yacimientos o tipos existentes, ni siquiera todos los importantes o los que van a tratarse más detalladamente en el curso. Y ello por varias razones prácticas, además de las ya expuestas. Entre ellas ha de mencionarse el gran ritmo de producción de nuevos conocimientos en este campo, fruto del enorme interés económico que están suscitando los recursos minerales en los últimos años. Este ritmo hace que las ideas evolucionen muy rápidamente y que, por tanto, los datos y los conceptos puedan volverse pronto obsoletos. Además, el continuo hallazgo de nuevos yacimientos modifica el panorama continuamente. Por ello, se ha considerado más útil y realista proporcionar al alumno una introducción general y, sobre esta base, remitirlo a una bibliografía seleccionada y, sobre todo, a las monografías, algunas de ellas excelentes, que se van publicando sobre el tema. A este fin se dedica la última parte del texto, que agrupa las fuentes bibliográficas en dos apartados: bibliografía recomendada, en la línea que acaba de exponerse, y referencias bibliográficas citadas en el texto (fuentes de figuras y tablas, datos utilizados, etc.). Existen también interesantes bases de datos en formato digital, accesibles vía internet, pero aunque pueden ser una fuente de información muy valiosa y se recurre a ellas en el desarrollo del curso, se ha renunciado a incorporarlas a esta relación bibliográfica, por dos razones: cambian con frecuencia, en todo caso a un ritmo mucho más rápido que el de vigencia de un texto escrito, y no todas son de acceso libre para el alumno.

Generación de yacimientos minerales

2. GENERACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES

¿Cómo se producen los procesos de concentración de determinados elementos, concretamente de los metales de interés económico, en la corteza terrestre?

Para responder a esta pregunta es necesario conocer, previamente, la composición de los materiales a partir de los cuales se han de concentrar dichos metales y la distribución de éstos en su seno. Este conocimiento permitirá comprender las relaciones entre los yacimientos y las rocas comunes, cuyos respectivos componentes han sido definidos por Washington como elementos metalogenéticos y petrogenéticos.

Tabla1. Composición química porcentual de la corteza, del manto, del núcleo y (total) del globo terrestre (Mason, 1966)

Elemento	Núcleo	Manto + Corteza	Corteza	Globo (Total)
O	86'3	43'7	45'4	29'53
Si		22'5	25'8	15'20
Mg		18'8	3'1	12'70
Fe		9'88	6'5	34'63
Ca		1'67	6'0	1'13
Al		1'60	8'1	1'09
Na		0'84	2'2	0'57
Cr		0'38		0'26
Mn		0'33	0'2	0'22
P		0'14	0'1	0'10
K		0'11	1'6	0'07
Ti		0'08	1'0	0'05
Ni		7'28		2'39
Co		0'40		0'13
S		5'96		1'93
Suma	99'94	100'03	100'0	100'0

Los trabajos de Goldschmidt, basados en la observación de las distribuciones de elementos en meteoritos y en fusiones metalúrgicas, así como en el conocimiento de sus propiedades químicas, a la luz del sistema periódico, han representado un gran avance en el intento de hallar una respuesta fundada geológicamente. Dado que el hierro, Fe, es el elemento más abundante en el globo terrestre (Tabla 1), sirve de base de comparación para los demás metales, lo mismo que el oxígeno, O, y el azufre, S, entre los elementos electronegativos. Los demás elementos se denominan siderófilos, calcófilos o litófilos ¹ según manifiesten más tendencia a asociarse con el Fe, con el S o con el O (Tabla 2). Los elementos enriquecidos en la atmósfera y en la biosfera se denominan atmófilos y biófilos, respectivamente.

Tabla 2. Clasificación geoquímica de los elementos según Goldschmidt

a			
FASES			
	Metálica	Sulfurada	Silicicatada
Si	0'015	0	21'60
Al			1'83
+ Fe	88'60		13'25
Mg			16'63
Ca			2'07
Na			0'82
K			0'21
Cr	300	1200	3900
+ Ni	84900	1000	3300
+ Co	5700	100	400
Ti	100	0	1800
Mn	300	460	2050
x Cu	200	500	2
x Zn	115	1530	76
x Ag	5	19	0
+ Au	2	0'5	0
+ Pt	16	3	0
+ Sn	100	15	5
+ Mo	17	11	3

¹ Del griego *síderos* (hierro) deriva su nombre el primer grupo. El segundo, del gr. *chalkós* (cobre), debido a la manifiesta tendencia del cobre a combinarse con el azufre (sulfuros: calcopirita, etc.). El tercer grupo debe su nombre a que el elemento que muestra mayor afinidad por el oxígeno, el silicio, es el metal más abundante de la capa exterior del globo terrestre (litosfera, del gr. *lithos*, piedra).

b			
ELEMENTOS			
Siderófilos	Calcófilos	Litófilos	Atmósfilos
Fe Co Ni Ru Rh Pd Re Os Ir Pt Au Mo Ge Sn C P (Pb) (As) (W)	Cu Ag (Au) Zn Cd Hg Ga In Ti (Ge) (Sn) Ob As Sb Bi S Se Te (Fe) (Mo) (Re)	Li Na K Rb Cs Be Mg Ca Sr Ba B Al Sc Y T.R. (C) Si Ti Zr Hf Th (P) V Nb Ta O Cr W U (Fe) Mn F Cl Br I (H) (Ti) (Ga) (Ge) (N)	H N (C) (O) (F) (Cl) (Br) (I) Gases Inertes

a) Distribución de algunos metales (concentraciones medias, en % para elementos mayores y en ppm para los menores) entre las fases metálica, sulfurada y silicatada de diversos meteoritos, según datos de varias fuentes (Krauskopf, 1967).

b) Clasificación geoquímica de los elementos, según Goldschmidt (1954); entre paréntesis se indican elementos cuyas propiedades les permiten asociarse en más de un grupo –véase texto-, siendo el característico aquél en que no existe dicho símbolo. TR= tierras Raras.

Obsérvese la correspondencia entre los datos de ambas tablas (a y b), de acuerdo con las explicaciones del texto. Para facilitar la comparación, en la tabla (a) se han precedido con los signos + y x, respectivamente, los elementos siderófilos y calcófilos, dejando sin señalar los litófilos, según Goldschmidt.

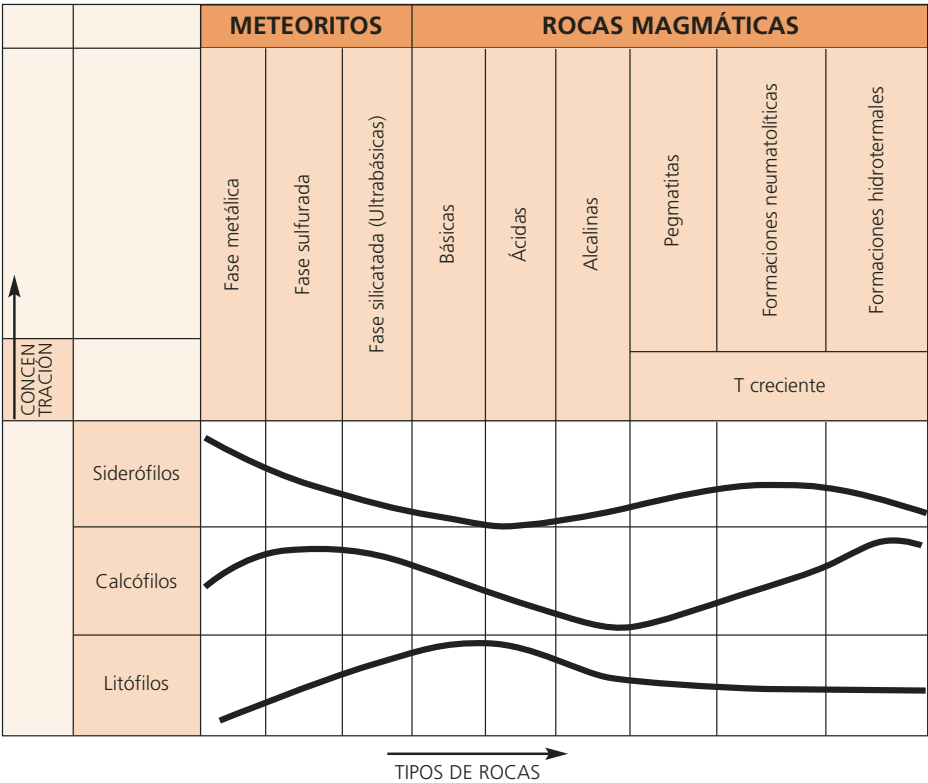
Por tanto, en una primera aproximación –basada en datos globales terrestres y de meteoritos-, se deduce que los elementos siderófilos estarán enriquecidos en el núcleo terrestre (siderosfera), los calcófilos en una zona intermedia de sulfuros del manto (calcosfera) y los litófilos en la litosfera, en correspondencia con el Tabla 2. Luego están los elementos atmófilos, concentrados en la atmósfera, y los biófilos, en los seres vivos o en sus residuos. El modelo primitivo, en capas, de Goldschmidt ha sido discutido y en parte modificado o afinado, pero indudablemente su clasificación en grupos traduce el comportamiento –comprensible químicamente, si se tiene en cuenta la posición en el sistema periódico- de los elementos en cuestión: por ejemplo, entre los metales, algunos, como el platino, muestran preferencia por el comportamiento “noble”; otros como el cobre, forman sulfuros; otros, como el silicio, se oxidan. Naturalmente, cada caso se verá influido por diversos factores, como la riqueza en azufre y en oxígeno del medio, la temperatura, etc., por lo que en la naturaleza se dan también numerosas transiciones. Pueden darse incluso excepciones, como la aparición de sulfuros de Mg y de Ca (típicamente litófilos, comp. Tabla 2) o de Cr (litófilo igualmente) en algunos meteoritos con exceso de S; asimismo, no son raros los sulfuros de Ni (siderófilo), incluso en la corteza terrestre.

En conclusión, la división de Goldschmidt es muy útil para comprender el comportamiento de los elementos químicos y sus tendencias generales a la asociación en determinadas paragénesis ², yacimientos y rocas (Fig. 1), pero no debe ser aplicada indiscriminadamente, sin tener en cuenta el contexto geológico y geoquímico.

La posibilidad de relacionar el ciclo geológico con el comportamiento geoquímico de cada elemento (ciclo geoquímico), según se ha expuesto, es la base de partida para responder a las preguntas iniciales. Sobre esta base, tal como ya se intuye en la Fig.1, se trabajará ahora en el estudio concreto de cada serie de yacimientos.

En definitiva, la investigación de yacimientos ha de conducir al conocimiento de los procesos geológicos que producen concentraciones económicas de las diversas sustancias útiles, lo que, expresado en términos geológicos, equivale a explicar y predecir en qué condiciones y lugares se dan los factores de enriquecimiento necesarios para obtener un yacimiento explotable, a partir de las concentraciones litosféricas comunes (Tabla 3).

Fig. 1.- Concentraciones relativas de elementos de diversos grupos en meteoritos y rocas magmáticas (modificado de Szadeczky-Kardoss, 1952).



² Paragénesis es el conjunto de minerales asociados naturalmente en una roca o yacimiento mineral, originados simultáneamente y en las mismas condiciones (en equilibrio).

Tabla 3. Contenidos medios de diversos metales en la corteza, contenidos mínimos de interés económico en yacimientos y factores de enriquecimiento correspondientes (modif. de Scheneiderhöhn, 1962)

METAL	CONTENIDO MEDIO EN LA CORTEZA		CONTENIDO MÍNIMO EXPLOTABLE (estim. para conc. hipogénica)	FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO
	p.p.m	%		
Fe	50000	5	25-30%	5-6x
Au	0.005	-	2ppm	400x
Al		8.13	30%	3.7x
Mn	1000	0.1	35%	350x
Cr	200	0.02	30%	1500x
Ni	80	0.008	1.5%	188x
Zn	80	0.008	4%	500x
Cu	70	0.007	1%	140x
Sn	40	0.004	1%	250x
Ag	0.1	-	500ppm	5000x
Pb	16	0.0016	4%	2500x

Definiciones

3. DEFINICIONES

Para facilitar el seguimiento a los no especialistas, se va a precisar el significado de algunos términos de uso corriente en investigación de yacimientos. No se explicarán, por suponerlos conocidos, los más usuales, como filón, bonanza, manto, relleno, sustitución, impregnación, magma, ganga, roca de caja, etc. O los más generales de Geología.

Una concentración mineral es singenética cuando se ha producido al mismo tiempo que la roca que la contiene y epigenética ³ cuando es posterior; en el primer caso, la génesis de la mena y de la roca está condicionada por los mismos factores; cosa que no ocurre en el segundo. Es exogenética o endogenética según se forme, respectivamente, en la parte superficial (externa) o más profunda (interna) de la corteza terrestre. Otra forma de decir lo mismo es hablar de procesos supergénicos (o hipergénicos) e hipogénicos según tengan su origen en la superficie terrestre, los primeros –también llamados descendentes, al actuar “per descensum”- o en el interior de la litósfera, los segundos –ascendentes, actúan “per ascensum”-. Cuando una concentración mineral se forma durante la diagénesis, suele recibir el nombre de sin-diagenética, aunque, propiamente hablando, no sea singenética con respecto a los principales minerales de la roca; las diversas combinaciones sin-sedimentaria, sin-magmática, etc. se explican por sí mismas.

En resumen, los conceptos sin- y epi- se refieren al tiempo (simultaneidad o no) y los exo- y endo-, al espacio (ámbito de formación). Los términos “familiar” y “extranjero”, usados por Routhier (1969), son también espaciales, como sus equivalentes “indígena” y “exótico” (Dixon, 1979), refiriéndose a la procedencia (de la misma roca o no, respectivamente) de las sustancias concentradas.

³ Estos términos han surgido como alternativa a los empleados por Amstutz, quien –para una mayor precisión en las discusiones singénesis vs. epigénesis- designó como “endógenos” o “exógenos”, respectivamente, a los materiales procedentes de las mismas formaciones que los contienen o del exterior (por ejemplo, la barita encontrada en sedimentos de los depósitos del tipo Mississippi Valley, Zimmermann y Amstutz, 1964), independientemente de que su origen sea superficial o profundo. Pero estas acepciones entran en contradicción con las habitualmente admitidas hoy en Geología, que se refieren en un sentido amplio a la ubicación original de los materiales y procesos en la litosfera. Así pues, en lo que sigue, no se insistirá en estas discusiones y se emplearán los términos endógeno y exógeno en su sentido más común en Geología: profundo (o interno) y superficial (o externo) con respecto a la litosfera, respectivamente.

Por otra parte, no siempre es posible concluir en un origen inequívoco, sin- o epigenético, para un yacimiento, por la sencilla razón, entre otras, de que en la génesis de éste pueden concurrir procesos variados y en diversos momentos. Los yacimientos en que así acaece y aquéllos en que los materiales proceden de diversas fuentes se pueden denominar poligenéticos. Otros conceptos que se emplean para referirse al origen de los materiales, como organógeno, magmatógeno, terrígeno... se explican por sí mismos: procedentes de seres vivos o de su actividad, de un magma, de las masas continentales (por erosión y sedimentación detrítica).

Primarios son los minerales originalmente formados en un determinado proceso y secundarios, los que los sustituyen o se han formado a sus expensas; cuando la sustitución se realiza conservando las formas originales del componente(s) sustituido(s), se habla de pseudomorfismo. Procesos metasomáticos son aquéllos en que tiene lugar un cambio de composición de los materiales considerados, por intercambio de materia o reacciones de sustitución, en estado sólido (es decir, sin que haya fusión, aunque intervengan fases fluidas activas).

Cuando un yacimiento está sometido a acciones – por ejemplo tectónicas- que producen redisolución y redistribución de sus materiales, se dice que ha habido removilización, hablándose de secreción lateral cuando la redistribución se realiza en el interior de la formación afectada, habitualmente estratiforme (es decir, los materiales movilizados proceden de la misma formación en la que se concentran). Si la removilización afecta, a gran escala, a los yacimientos de una zona orogénica policíclica, se habla de yacimientos regenerados (Schneiderhöhn). El concepto de herencia metalogenética indica la formación de yacimientos a partir (“por herencia”) de pre-concentraciones más antiguas, que se enriquecen por procesos posteriores en las zonas consideradas; cuando puede probarse un “parentesco” (relación entre los materiales), se habla de consanguineidad.

En resumen, casi nunca es suficiente una sola palabra para dar cuenta de la complejidad y variedad de los procesos implicados, lo que no siempre se ha tenido en cuenta. Así se ha llegado a la superposición de conceptos –buen número de los cuales han caído en desuso-, en acumulación progresiva a medida que se sucedían trabajos, teorías e interpretaciones; esta evolución queda reflejada en la existencia de términos casi equivalentes o con significados incompletos o contradictorios, los cuales no pocas veces difieren según los diversos autores. Se tratará de simplificar al máximo la terminología empleada, sin renunciar a la necesaria precisión; para ello se buscará más bien la comprensión de los procesos generadores que la definición de yacimientos mediante conceptos preestablecidos y no siempre adecuados. Es interesante recordar que la misma praxis profesional ha reaccionado en este sentido, por ejemplo mediante la introducción de conceptos y términos pragmáticos, como el de metalotecto, de gran utilidad por su carácter universal y objetivo.

Metalotecto es cualquier objeto o rasgo geológico que aparece relacionado con una concentración metálica (por extensión, puede aplicarse también a una concentración mineral, normalmente de interés económico). Se entiende que:

- al decir “cualquier” objeto o rasgo geológico se significa que éste puede ser de naturaleza variada (magma, falla, edad, alteración, estrato...);
- “relacionado con una concentración” implica simplemente una asociación real entre el objeto o rasgo geológico en cuestión y el metal o sustancia considerados, sea cual sea el tipo de relación (espacial, temporal, composicional, genética, etc.);
- esta relación, no necesariamente genética, ha de ser objetiva y verificable por cualquier observador, no hipotética o meramente interpretativa; ha de ser definida con precisión, en términos descriptivos.

El concepto de metalotecto es de gran utilidad para la exploración minera, por facilitar los primeros pasos hacia la identificación de yacimientos minerales.

Clasificación de los Yacimientos

4. CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS

Un yacimiento es una concentración mineral de valor económico, es decir, explotable. Un indicio se transforma en yacimiento cuando su interés económico se ha probado; algunos indicios, de explotación no rentable actualmente pero que puede serlo en el futuro, son yacimientos potenciales. La diferencia entre indicio y yacimiento es, pues, económica. Pero esta diferencia está condicionada por una serie de circunstancias (desarrollo tecnológico, distancia, precios...) independientes del yacimiento en sí.

El estudio de yacimientos o Metalogenia, por tanto, no puede depender exclusivamente de los parámetros económicos, sino que ha de centrar su atención, en primer lugar, en las concentraciones –así como en los indicios- y en los factores y procesos geológicos de los que depende su formación y distribución. De ahí que actualmente se va restringiendo el uso de las clasificaciones que tienen una base económica o técnica (por ejemplo, la mena beneficiada, los metales obtenidos), en favor de las clasificaciones más geológicas.

Entre éstas pueden elegirse diversos criterios (morfológicos, composicionales, descriptivos, geotectónicos...), como punto de partida para la clasificación, obteniéndose otras tantas clasificaciones, según el fin perseguido. Las más prácticas, a efectos de exploración, son tal vez las tipológicas. Las más completas, desde el punto de vista metalogenético, aunque también las más difíciles, son las genéticas.

En efecto, el establecimiento de la génesis sigue siendo un objetivo tan irrenunciable para el metalogenista, como útil para el minero: el clasificar genéticamente un yacimiento significa que se comprende el tipo de procesos generadores, los factores que los condicionan, etc. Todo lo cual es una ayuda, tanto para conocer –y, por tanto, ubicar y explorar racionalmente, asentando la inversión sobre la base firme de reservas reales- el yacimiento, cuanto para encontrar otros similares. El hallazgo del famoso distrito uranífero de Blind River (Ontario, Canadá), a partir de interpretaciones debidas al tesón del geólogo Franc Joubin, es un ejemplo ilustrativo. A la inversa, una idea genética equivocada puede dar lugar a errores lamentables: puede entrañar, en investigación aplicada, el abandono de zonas realmente prometedoras, pero que no se estimaron así, a causa de ideas preconcebidas y por carecer de suficiente flexibilidad y capacidad observadora para modificarlas.

No obstante, los conocimientos acerca de los procesos genéticos, aunque en claro progreso, son todavía bastantes limitados. Ello explica, quizá, el número y la intensidad de las polémicas registradas a lo largo de la, todavía relativamente corta, historia de la Metalogenia. A ello se añade el efecto oscurantista de ciertos términos usados a veces con más profusión que acierto, que pueden dar al no iniciado la impresión de encontrarse ante algo muy difícil. Finalmente, el cambio de las modas de pensamiento dominantes, según las épocas, puede hacer que diversos yacimientos cambien de lugar en la clasificación, cosa que ha ocurrido, por ejemplo, con los conocidos depósitos de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica, hoy –tras diversos avatares- reconocidos como yacimientos exhalativos submarinos, de origen volcano-sedimentario.

A pesar de todos estos riesgos y limitaciones, de los que el metalogenista ha de ser lúcidamente consciente, la clasificación genética sigue ocupando un puesto primordial en Metalogenia, por las razones expuestas más arriba y por ser la más profundamente científica: la que relaciona causas y efectos. Su utilidad depende de los criterios que se sigan para establecerla: así, la de Lindgren, todavía de amplio uso en América, no siempre resulta práctica, por referirse a criterios físico-químicos no fáciles de establecer. La más extendida en Europa es tal vez la de Schneiderhöhn (1962), que tiene en cuenta condiciones de formación, rocas relacionadas y asociaciones mineralógicas, resultando en general bastante útil, aunque, naturalmente, las ideas genéticas del autor no siempre coinciden con las más ampliamente aceptadas hoy, por lo que se han hecho diversas adaptaciones.

La clasificación que se sigue en esta exposición, inspirada en principio en la de Schneiderhöhn, aunque con acusadas modificaciones, está basada en la consideración de los procesos genéticos como elementos clave. Éstos no siempre son simples; incluso puede darse – frecuentemente se da, de hecho- una convergencia entre distintos tipos de procesos, la cual puede ser favorable para la concentración mineral (positiva), o bien de efecto contrario (negativa). No se buscará tanto el clasificar yacimientos, como el comprender el tipo de procesos fundamentales para su formación y las relaciones entre ellos. Se trata, con ello, de evitar el caer en discusiones inútiles acerca de causas desconocidas, para centrarse en la interpretación de los datos observados, sin renunciar a la comprensión global de los fenómenos genéticos.

Las discusiones habidas en torno a los yacimientos hidrotermales pueden ilustrar el peligro que se quiere evitar. Las disoluciones hidrotermales habían sido consideradas habitualmente como derivadas de un magma, incluyéndose por tanto los yacimientos correspondientes entre los de la serie magmática; la demostración de que hay otros procesos (no magmáticos: vbgr. metamórficos, tectónicos, diagenéticos) que pueden originar disoluciones hidrotermales dio lugar a cierta confusión, al chocar con dichos moldes tradicionales de clasificación, llevando a la proposición del término hidatógeno para estos casos. Actualmente, ya suele admitirse la palabra hidrotermal sin implicar siempre y exclusivamente una derivación magmática, lo que en definitiva no es sino volver a la definición original (1847) de Bunsen.

Considerando los procesos generadores de yacimientos dentro del marco global de los procesos conformadores de la corteza terrestre, se distinguen dos tipos esenciales (endógenos y exógenos), de cuya convergencia resulta el ciclo geológico de los materiales terrestres (Fig.2), abarcando el ciclo geodinámico interno y el externo. Los yacimientos correspondientes se llaman endogénicos (generados en el interior de la corteza terrestre) y exogénicos (en el exterior), respectivamente.

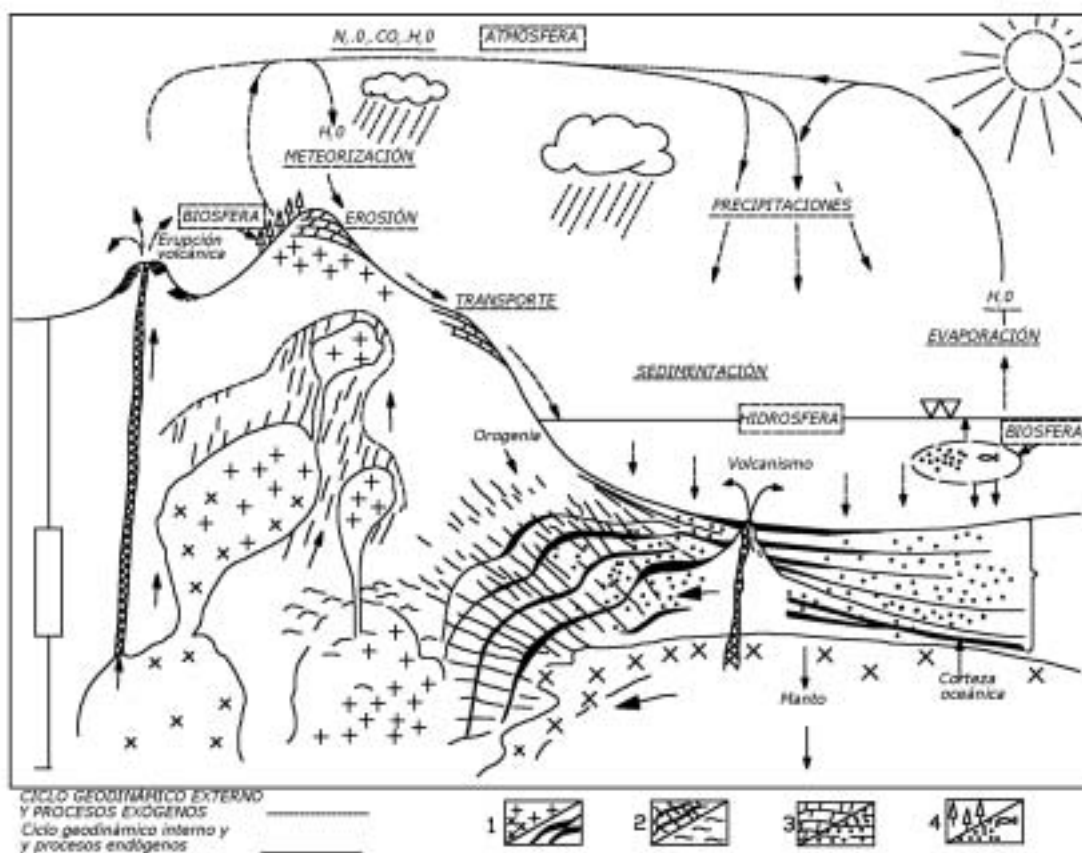
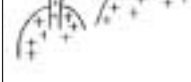


Fig. 2.- Ciclo geológico de los materiales terrestres. 1 Rocas ígneas: plutónicas/volcánicas. 2 Rocas metamórficas/migmatitas. 3 Sedimentos: litificados/no consolidados. 4 Biosfera: terrestre/marina (algas, etc).

Los primeros se dividen, lógicamente, según los tipos de procesos endógenos: yacimientos de la serie magmática (plutónicos, subvolcánicos, volcánicos; Fig.3) y yacimientos de la serie metamórfica (Fig.2).

Fig.3.- Esquema de clasificación de los yacimientos de origen magmático, atendiendo a sus condiciones de formación (modificado de Schneiderhöhn, 1962).

YACIMIENTOS VOLCANICOS Y SUBVOLCANICOS		YACIMIENTOS PLUTONICOS							
Rocas efusivas y yacimientos exhalativos		Niveles de deposito en relación con el batolito	Tipo de yacimiento según su posición con respecto al magma generador	Profundidades de formación		Temperaturas de formación		Grupos de yacimientos	
				Medias en m.	Extremas en m.	Minimas	Máximas		
Yacimientos subvolcánicos		Cripto Batolítico	Telemagmático	1000	0 / 300	100°		(Anotermal)	Hidrotermal
			Criptomagmático		300 / 1300	200°		Epitermal	
Rocas ígneas subvolcánicas		Acro	Apomagmático	2000	1000 / 4000	300°		Mesotermal	
			Perimagmático	3000	1000 / 4000	350°	450°	Catatermal	
Rocas ígneas profundas		Epi Em Endo Hipo	Intramagmático	4000	1000 / 10000	450°	550°	Pneumatolítico	Líquido magmático
				5000	1000 / 10000	500°	600°	Pegmatítico	
				6000					

Los segundos se designan también como yacimientos del ciclo sedimentario (Fig.4), aunque no todos los procesos sean siempre exclusivamente sedimentarios (vbgr. los yacimientos exhalativos submarinos volcano-sedimentarios o SMV, sulfuros masivos volcanogénicos). Esto se justifica porque el criterio esencial para la clasificación genética no es el origen remoto o primordial de los elementos, sino el carácter de los procesos de concentración fundamentales: en el caso citado, hay aportes volcánicos, pero los procesos de concentración –precipitación de sulfuros en cuencas submarinas- son sedimentarios; de la misma manera, un magma que se enriquece por asimilación de pre-concentraciones sedimentarias –hipótesis propuesta, por ejemplo, para granitos estanníferos- puede dar lugar, al consolidarse, a diversos tipos de yacimientos magmáticos.

Se considerarán, por tanto, fundamentalmente tres familias o series ⁴: magmática, metamórfica, sedimentaria. Hay también procesos particulares que deben considerarse para ciertos depósitos, como las acciones metasomáticas en yacimientos de tipo skarn o albitita-greisen; el metasomatismo, no obstante, no se reduce al ámbito magmático -en realidad, es más bien un proceso metamórfico-, por lo que no constituye, por sí solo, un criterio definitorio.

De acuerdo con cuanto antecede, se ofrece (Tabla 4) una versión modificada y simplificada de la clasificación de Schneiderhöhn. Se ha procurado evitar el peligro de rigidez que acecha a toda clasificación, prefiriendo la sencillez al perfeccionis-

⁴ Se admiten no sólo transiciones entre ellas, según se acaba de explicar, sino también entre los distintos grupos de cada una, sin necesidad de crear subdivisiones excesivas; en cada grupo se incluyen también, en general, yacimientos que representan una transición al siguiente.

mo, ya que el excesivo afán de definición es poco adecuado a la variedad de los fenómenos naturales y a la larga conduce a errores, por querer obligar a que los datos encajen en los esquemas pre-establecidos. Se tiene en cuenta que la clasificación es tanto más valiosa cuanto más útil sea; por ello, ya que no siempre se encuentran yacimientos cuya génesis sea perfectamente conocida, ha de ser aplicable aun en los casos en que dicho conocimiento es todavía un tanto vago. Se añade, pues un grupo final para yacimientos mixtos o de génesis poco conocida.

No entra en el propósito de esta breve síntesis la discusión de los distintos tipos de yacimientos metálicos, pero se comentarán algunos más representativos, ya sea por su importancia real o potencial (vbgr. algunos tipos hidrotermales o metamórficos), ya como los modelos o ejemplos de procesos de concentración operativos en la naturaleza (vbgr. enriquecimiento supergénico). La nomenclatura (o signos: I, I.1, I.1.1., I.1.2., etc.) del cuadro de clasificación (Tabla 4) se conserva en la sucinta descripción de los yacimientos o grupos seleccionados en las páginas que siguen, indicándose (si procede) en el texto (o al margen, a la izquierda), a fin de evitar repeticiones de los nombres correspondientes.

Tabla 4. Clasificación genética de yacimientos de menas metálicas

A.- YACIMIENTOS ENDOGÉNICOS		
I.- Serie Magmática		
1.- Líquido –magmáticos:		
Formaciones de cromita en rocas ultramáficas	I.1.1.	
Formaciones de sulfuros de Ni y Cu en rocas máficas	I.1.2.	
Formaciones con Pt y platinoides	I.1.3.	
Formaciones de titano-magnetita en rocas máficas	I.1.4.	
Formaciones magnetita-apatito	I.1.5.	
Formaciones apatito-nefelino	I.1.6.	
Formaciones carbonatíticas	I.1.7.	
Formaciones diamantíferas	I.1.8.	
2.- Pegmatítico – neumatolíticos:		
Formaciones pegmatíticas	I.2.1.	
Formaciones de albitita-greisen	I.2.2.	
Formaciones de skarn (con magnetita / con sulfuros)	I.2.3.	
3.- Hidrotermales:		
Formaciones Au/Ag	I.3.1.	
Formaciones de sulfuros de cobre (pórfidos y otros)	I.3.2.	
Formaciones Pb-Ag-Zn	I.3.3.	
Formaciones Ag-Co-Ni-Bi-U (As-Sb)	I.3.4.	
Formaciones Sn-W y Sn-Ag-W-Bi	I.3.5.	
Formaciones Sb-Hg (As, Se)	I.3.6.	
Formaciones de carbonatos y óxidos de Fe, Mn, Mg	I.3.7.	
Otras formaciones	I.3.8.	

II.- Serie Metamórfica:

- | | |
|---|-------|
| 1.- Formaciones de metamorfismo de contacto | II.1. |
| 2.- Formaciones de metamorfismo regional y dinámico | II.2. |
| 3.- Formaciones complejas polimetamórficas | II.3. |

B.- YACIMIENTOS EXOGENICOS

III.- Serie Sedimentaria:

- | | |
|--|----------|
| 1.- Concentraciones descendentes: | |
| Zonas de oxidación y de cementación | III.1.1. |
| Concentraciones infiltrativas | III.1.2. |
| 2.- Concentraciones residuales | III.2. |
| 3.- Yacimientos detríticos | III.3. |
| 4.- Yacimientos de precipitación química: | |
| Continentales | III.4.1. |
| Litorales y sub-acuáticos | III.4.2. |
| En fondos oceánicos | III.4.3. |
| 5.- Yacimientos exhalativos, volcano-sedimentarios | III.5. |

C.- YACIMIENTOS MIXTOS

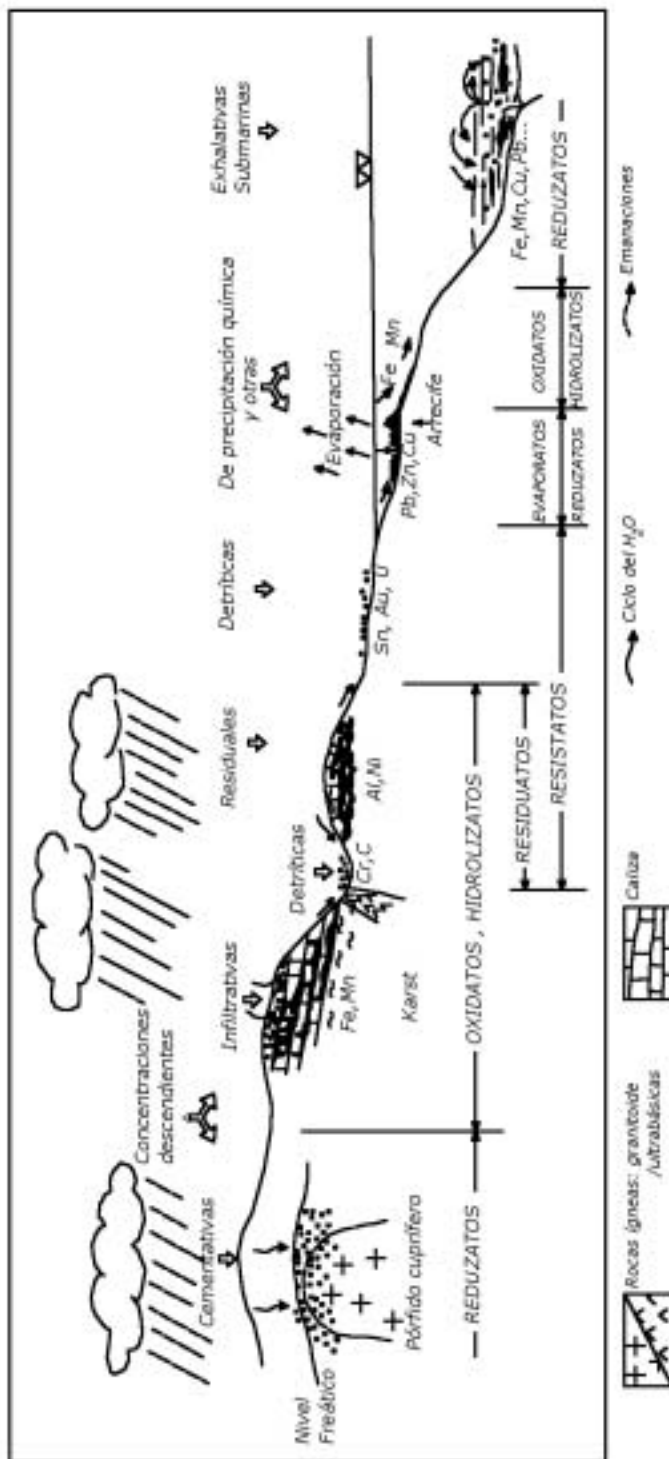


Fig. 4.- Representación esquemática de procesos generadores de las concentraciones exógenas mencionadas. El esquema, muy simplificado, no representa todas las posibilidades ni puede expresar la diversidad de factores determinantes, como el clima, la litología, etc.

Yacimientos de la Serie magmática

5. YACIMIENTOS DE LA SERIE MAGMÁTICA

Comprende este grupo los yacimientos formados en relación con rocas ígneas y por procesos de concentración de índole magmática: plutónicos, hipoabisales o subvolcánicos y volcánicos (Fig.3). Los yacimientos volcanogénicos subacuáticos se forman al introducirse productos exhalativos en cuencas sedimentarias, generalmente marinas, en las que se dan procesos de concentración y precipitación exogénicos ⁵, por lo que los depósitos así formados se tratarán en el apartado correspondiente, de acuerdo con los criterios genéticos expuestos anteriormente.

Estos yacimientos se ordenan según las formaciones magmáticas con las que se relacionan, lo que a la vez permite darles una amplia interpretación geológica y geotectónica. Por ello se consideran en primer lugar los yacimientos asociados con rocas ultramáficas y máficas y luego los relacionados con rocas ricas en sílice o ácidas ⁶.

5.1 EN RELACIÓN CON ROCAS MÁFICAS Y ULTRAMÁFICAS

(I.1.)

Las rocas ultramáficas y máficas pueden aparecer asociadas a concentraciones de diversos elementos de interés económico, como Cr, Ni, Cu, Fe, Ti, V, Pt o EGP (Elementos del Grupo del Platino) y también oro (Fig.5b). En general, se designan como concentraciones ortomagmáticas, de segregación magmática, líquido-magmáticas, intramagmáticas o simplemente magmáticas, en alusión al carácter magmático de los procesos dominantes de concentración metálica. La cristalización fraccionada se considera un mecanismo importante para la concentración de Cr, Ti, Fe y V, así como la segregación magmática o inmiscibilidad de sulfuros en el fundido da lugar al enriquecimiento preferente de Ni, Cu, EGP y Au en la fase sulfurada. No obstante, la génesis magmática se cuestiona en algunos casos en los que se reconocen procesos hidrotermales que pueden desempeñar un papel relevante (EGP).

⁵ No ha de olvidarse, sin embargo, que caben diversas posibilidades; así, por ejemplo, las chimeneas volcánicas submarinas pueden ser mineralizadas por los fluidos ascendentes, lo que en ningún caso es un proceso sedimentario. Se evitará por tanto, la estrechez para clasificar estos fenómenos: las ideas aquí expuestas han de entenderse como generales y no como absolutas ni exclusivas.

⁶ Recuérdese que la numeración de la Tabla 4, para la clasificación de los diversos yacimientos, se conserva en la descripción de los mismos, indicándose al margen, a la izquierda del texto correspondiente, en lugar de repetir los nombres. Se agilizará así la lectura facilitando el encuentro de cada tipo en el texto.

Las rocas ultramáficas son prácticamente la fuente exclusiva de cromita, que se segrega en las fases tempranas de cristalización y se encuentra en los grandes complejos estratificados en cratones (Bushveld, en la República Sudafricana) o en depósitos podiformes, orogénicos o de tipo alpino (Albania, Grecia, Filipinas, Cuba, etc.) Las rocas máficas son también una fuente importante de níquel, Ni, aunque la principal (Sudbury, en Ontario, Canadá) es atípica, por suponerse fruto de un impacto meteorítico.

Pueden asociarse a este grupo las kimberlitas diamantíferas, aunque la génesis del diamante podría también atribuirse al metamorfismo mantélico profundo y aunque con frecuencia sean importantes ciertos procesos sedimentarios para la generación de importantes depósitos actualmente explotados (placeres, por desmantelamiento de chimeneas kimberlíticas o transporte selectivo de materiales piroclásticos del mismo origen). Se destacan a continuación las formaciones más típicamente asociadas a metales preciosos, EGP. Ha de señalarse, no obstante, que éstos también se encuentran, en pequeñas cantidades, en otras formaciones, como los Kupferschiefer o esquistos cupríferos centroeuropeos.

(I.1.3.)

Los yacimientos de platinoideos aparecen asociados a formaciones peridotíticas con cromita (EGP enriquecidos preferentemente: Os, Ir, Ru) y a formaciones gabronorita, con titanio-magnetita y/o sulfuros de Ni y Cu (EGP enriquecidos preferentemente: Pt, Pd, Rh). Los contenidos de dichos metales pueden ser muy variables, lo que también ocurre con el oro. Éste tiene más afinidad con los EGP menos “refractarios”, Pd, Pt y Rh, los cuales se movilizan con más facilidad por procesos hidrotermales.

5.2 EN RELACIÓN CON ROCAS ÁCIDAS (I.2. Y I.3.)

(I.2.)

Los yacimientos pegmatíticos, neumatolíticos e hidrotermales (grupos I.2 y I.3.) están relacionados en su mayor parte con rocas intermedias y ácidas, originadas generalmente en estadios intermedios del desarrollo orogénico (plegamientos, metamorfismo, intrusiones: Fig. 2). El magmatismo intermedio-ácido es muy importante por el número y variedad de yacimientos que ha originado. La extensión que se le dedica en estas páginas no puede hacer justicia a su importancia económica: se ha preferido presentar un esquema general de los procesos generadores y de sus relaciones, que permita obtener una visión de conjunto, antes que perderse en la descripción detallada de la multitud de las (importantísimas) formaciones correspondientes.

Los magmas graníticos (s.l.) no poseen —a diferencia de los máficos— elementos de interés económico que se separen en las primeras fases cristalinas. En general poseen gran cantidad de metales, pero en muy pequeñas proporciones (Tabla 5), por lo que no tienen oportunidad de segregarse en menas propias. Al no entrar en las redes cristalinas de los minerales que se van formando, se concentran en las

fases fluidas residuales, las cuales al final del proceso pueden estar lo bastante enriquecidas como para formar depósitos económicos (filones, impregnaciones), generalmente epigenéticos (Fig. 5.1 a, .2 a, .3 a). Estas fases fluidas, fruto de la evolución magmática, se han enriquecido también en los componentes más volátiles (agua, gases), por lo que suelen adquirir una notable actividad química, que produce características alteraciones en la roca encajante (Fig. 5. 3 a.1. y 3 a.2.)

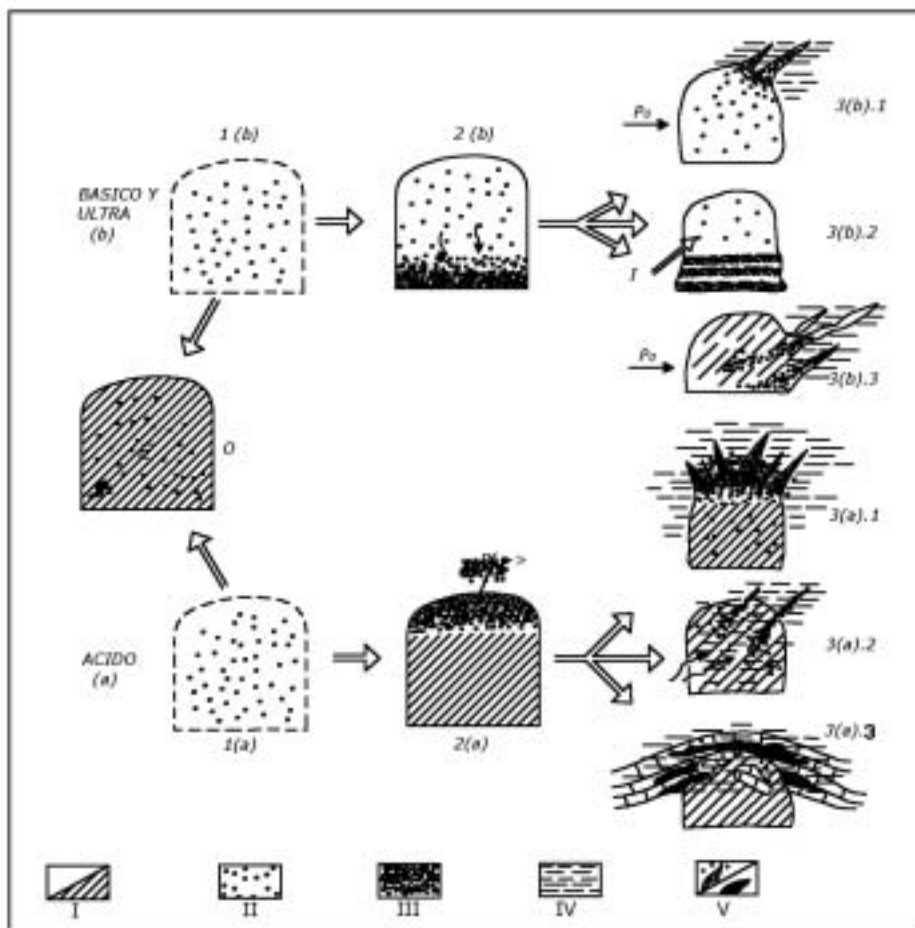


Fig. 5.- Procesos de enriquecimiento en magmas ácidos (a) y máficos/ultramáficos (b). 1 Magma inicial con metales dispersos en la masa fundida. 1-2-3 Evolución productiva (hay diferenciación y se forman yacimientos), 1-0 Evolución estéril (cristalización sin diferenciación; se consolida roca estéril de muy baja ley metálica: E). I Cámara magmática inicial: magma fundido/solidificado. II Metales dispersos. III Metales concentrados (mena). IV Alteración de la roca de caja. V Cuerpos mineralizados: filones / lentejones.

Tabla 5. Abundancias medias (en ppm) de diversos elementos (Krauskopf, 1967).

Elemento	Corteza	Granito	Basalto	Argilita	Agua marina
O	46 4 X 10 ⁴				857.000
Si	28 2 X 10 ⁴	32.3 X 10 ⁴	24.0 X 10 ⁴	23.8 X 10 ⁴	3.0
Al	8 2 X 10 ⁴	7.7 X 10 ⁴	8.8 X 10 ⁴	8.0 X 10 ⁴	0.01
Fe	5 6 X 10 ⁴	2.7 X 10 ⁴	8.6 X 10 ⁴	4.7 X 10 ⁴	0.01
Ca	4.1 X 10 ⁴	1.6 X 10 ⁴	6.7 X 10 ⁴	2.5 X 10 ⁴	400
Na	2 4 X 10 ⁴	2.8 X 10 ⁴	1.9 X 10 ⁴	0.66 X 10 ⁴	10.500
Mg	2 3 X 10 ⁴	0.16 X 10 ⁴	4.5 X 10 ⁴	1.34 X 10 ⁴	1.350
K	2 1 X 10 ⁴	3.3 X 10 ⁴	0.83 X 10 ⁴	2.3 X 10 ⁴	380
Ti	5.700	2.300	9.000	4.500	0.001
Mn	950	400	1.500	850*	0.002
S	260	270	250	220	885
C	200	300	100	1.000	28
Rb	90	150	30	140*	0.12
Ni	75	0.5	150	95	0.002
Zn	70	40	100	80	0.01
Cu	55	10	100	57	0.003
Co	25	1	48	20	0.0001
Li	20	30	10	60	0.17
Nb	20	20	20	20	0.00001
Pb	12.5	20	5	20	0.00003
Be	2.8	5	0.5	3	6 X 10 ⁻⁷
U	2.7	4.8	0.6	3.2	0.003
Sn	2	3	1	6*	0.0008
As	1.8	1.5	2	6.6	0.003
W	1.5	2	1	2	0.0001
Sb	0.2	0.2	0.2	1.5*	0.0005
Bi	0.17	0.18	0.15	0.01	0.00002
Hg	0.08	0.08	0.08	0.4	0.00003
Ag	0.07	0.04	0.1	0.1	0.00004
Se	0.05	0.05	0.05	0.6	0.0004

No es fácil predecir cuándo un magma será productivo o no. Hay dos factores importantes: la composición del magma original y su evolución geológica. La importancia del primero es fácil de comprender: los magmas con mayor contenido metálico son los más prometedores, por ello se puede recurrir a analizar el contenido en elementos traza (metales diseminados) de la roca para saber si es favorable o no (litogeoquímica o prospección geoquímica en "roca sólida").

Por lo que respecta al segundo factor –evolución geológica–, hay diversas condiciones que pueden incidir en la formación de yacimientos, tales como:

- El carácter de las formaciones atravesadas o asimiladas por la intrusión:
 - su contenido metálico, que puede enriquecer el magma –se ha hablado de herencia metalogenética– o contaminarlo;

- su reactividad, su permeabilidad, su competencia,
 - todo ello influirá en la precipitación de las menas, en la posibilidad de sustituciones metasomáticas (Fig. 5. 3a.3), en el paso de fluidos mineralizadores, en la posibilidad de creación de suficiente espacio para el relleno filoniano, etc.;
- La diferenciación y evolución magmáticas, el contenido en volátiles y la composición de éstos, etc.;
 - Los procesos de cristalización. Por ejemplo, posibilidad de que un elemento metálico se disemine en la red de minerales magmáticos, con resultados desfavorables para la concentración, al producirse leyes muy bajas, en lugar de concentrarse en las fases residuales (Fig. 5. 1a; 0). A la inversa, posibilidad —en este caso favorable— de lixiviación y posterior precipitación (Fig. 5. 3a.2) de los metales así diseminados: por ejemplo, yacimientos estanníferos derivados del estaño contenido en la red de biotita (Tischendorf, 1969)
 - el nivel intrusivo, la tectónica, entre otros;

Las fases finales de la cristalización magmática son las de mayor significado económico (directo): se caracterizan por un elevado contenido en gases (vapores acuosos e iones mineralizadores, CO₂, compuestos de halógenos, B, S, etc.), aparte de los iones metálicos. En efecto, la mayor parte de los silicatos que cristalizan al principio son anhídros por lo que, cuando el granito se ha consolidado, las fracciones volátiles (acuosas) que no han sido fijadas y antes estaban diluidas en todo el magma, pasan a acumularse en el escaso espacio restante, aumentando considerablemente su presión (presión interna o presión de fluidos: Fig.5, 1 a; 2 a).

A partir de ese momento tiene lugar una compleja evolución, en cuyos resultados influyen decisivamente la presión, la temperatura, la composición y el carácter (pH, Eh) de los fluidos y las reacciones con las rocas circundantes. Evolución que se explicará de una manera simplificada, suponiendo una transición gradual desde la fusión magmática hasta las disoluciones de baja temperatura, hidrotermales ⁷.

En líneas generales, los fluidos pasan al enfriarse a partir de unos 600°C del estado hipercrítico (temperatura superior al punto crítico del agua) al hidrotermal (se suele situar la transición hacia los 400°C).

En condiciones hipercríticas se distinguen las fases pegmatítica y pneumatolítica, caracterizadas, como los gases, por su escasa viscosidad o gran movilidad (sobre todo la segunda). En las pegmatitas cristalizan todavía minerales anhídros análogos a los del granito (cuarzo, feldespatos alcalinos), junto con minerales que

⁷ Esta transición no siempre se da y no es raro que falten una o varias fases intermedias; para no hacer una exposición demasiado abstracta se ha seguido aproximadamente la serie de procesos que pueden observarse en uno de los ejemplos más representativos: los yacimientos de Sn-W.

incorporan componentes volátiles (micas, turmalinas, topacio...) y, dado el caso, con menas muy variadas (de Sn, Ta, Nb, tierras raras, Au, gemas, etc.); las texturas típicas son gráficas, con desarrollo de cristales de gran tamaño a causa de la baja viscosidad de los fluidos ricos en volátiles.

Los procesos neumatolíticos (del griego: pneuma, soplo, viento; lisis: disolución; implicando por tanto, transporte y disolución por gases, lo que no siempre está claro) se caracterizan por la sustitución metasomática de minerales ya depositados por otros estables en las nuevas condiciones, decididamente ácidas; dichos minerales incorporan elementos metálicos o volátiles de las activas disoluciones hipercríticas. El resultado de estos procesos es la neutralización de estas disoluciones –por reacción con las rocas circundantes- y la disminución de la presión interna –por fijación de volátiles en las fases cristalinas-, lo que, junto con el enfriamiento, caracteriza la evolución hacia el estadio hidrotermal, que se alcanza al llegar a temperaturas inferiores a la crítica del agua, es decir, cuando los fluidos se condensan, originándose verdaderas disoluciones acuosas y muy diversos tipos de yacimientos.

Los componentes y características físico-químicas de las disoluciones hidrotermales son ampliamente variables; como ya se ha indicado, existen casos en que su origen no es necesariamente magmático: basta el calentamiento y la movilización del agua contenida en las rocas, por diversos procesos. Aun partiendo de muy bajos contenidos metálicos (dilución) pueden dar lugar a grandes concentraciones, debido a la circulación de grandes cantidades de agua.

Si la presión interna (o presión de fluidos) ha alcanzado valores superiores a los de la externa (litostática, debida a la gravedad), superando adicionalmente la resistencia debida a la cohesión de las rocas, se producen fracturas y escapes de fluidos, que pueden dar lugar a rellenos filonianos o pérdidas en el exterior, según el nivel intrusivo.

El diagrama simplificado de Niggli, al que se ha añadido la representación del comportamiento de un magma en condiciones volcánicas ($P_{\text{interna}} > P_{\text{externa}}$), muestra gráficamente lo que antecede, desde el punto de vista físico-químico (Fig.6).

Como puede verse, en condiciones volcánicas se interrumpe la evolución y no se forman pegmatitas, sino una fase gaseosa, que se separa de un magma silicatado, faltando las fases intermedias. Entre estos extremos se sitúan los yacimientos subvolcánicos –más superficiales que los plutónicos e hipoabisales, por lo que las disoluciones tienen menos posibilidades de diferenciarse- y los volcanogénicos.

(1.2.1)

Hay varias clasificaciones de pegmatitas, así como diversos tipos, procesos genéticos y ámbitos geotectónicos generadores. Es útil distinguir las pegmatitas simples o comunes y las complejas. Las primeras tienen composiciones parecidas a

las del granito –principalmente cuarzo y feldespato potásico, con moscovita y, a veces, turmalina y berilo- y textura gráfica equigranular, permitiendo el beneficio de feldespato (microclino), mica (moscovita) y berilo. Las segundas tienen una composición mineralógica más variada (con minerales de Li, Rb, Cs, Nb, Ta, tierras raras,

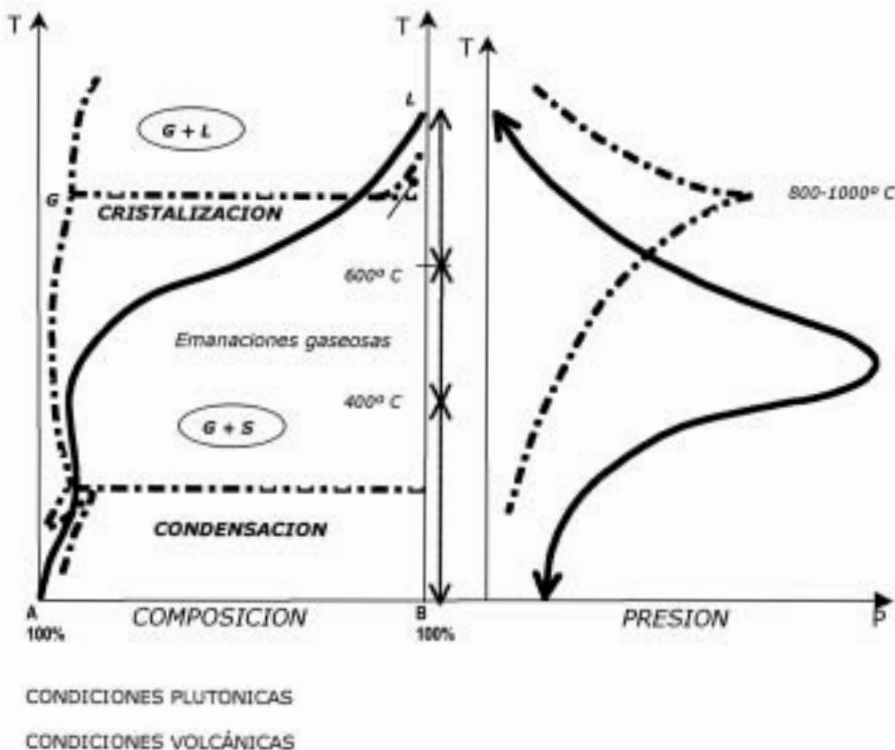


Fig. 6.- Relación de la temperatura con la composición (izq.) y con la presión (dcha.) en un sistema binario simple, compuesto por una fase volátil (A) y una refractaria (silicatada, B), en condiciones plutónicas y volcánicas, según Niggli y Zavaritsky (modificado de Huttenlocher u. Ramdohr, 1965).

Sn, W, U, etc.) y, generalmente, estructura zonada, pudiendo beneficiarse casiterita, columbita, espodumena, amblygonita, corindón, andalucita, grafito... (los minerales opacos no son aquí muy frecuentes, aunque pueden aparecer magnetita, wolframita, sulfuros, oro).

Entre los procesos neumatolíticos, son típicos los relacionados con yacimientos de Sn, W, Mo. Dada la complejidad de las texturas de reemplazamiento, no es raro encontrar varias generaciones e intercrecimientos, lo que puede exigir estudios microscópicos detallados para la concentración de menas.

(I.2.2.)

Los yacimientos de albitita-greisen⁸, relacionados con metasomatismo alcalino de intrusiones graníticas y considerados –sobre todo tras los trabajos de los autores rusos (Smirnov, 1976)- como un grupo específico, son un ejemplo de este tipo de procesos. Se registran un aumento de acidez y de temperatura en las fases tempranas –se suceden microclinización, albitización, greisenización- y un descenso progresivo de ambas al entrar en el período hidrotermal -albitización y microclinización tardías-. Esta evolución metasomática va acompañada de redistribuciones del contenido metálico de la masa granítica (Fig. 5: 1(a), 2(a), 3(a).2), concentrándose, entre otros metales tipomórficos, Zr, Nb, Ta, Th en las albititas y Be, Li, Sn, W en las formaciones de greisen (partes apicales de las cúpulas). Desde el punto de vista geotectónico, aparecen en zonas orogénicas y en plataformas reactivadas.

(I.2.3.)

Finalmente, los yacimientos neumatolíticos de contacto, metasomáticos de contacto, pirometasomáticos o, simple y más propiamente, de skarn -término minero escandinavo- son formaciones calcosilicatadas que se producen típicamente en la zona de contacto entre intrusiones (granitoides de diversos tipos y ámbitos geotectónicos) y rocas sedimentarias carbonatadas (más raramente, rocas silicatadas), por lo que en esencia deberían considerarse como formaciones metamórficas. Se distinguen, por su composición, los skarns cálcicos y los magnésicos. Los primeros suelen ser los más interesantes económicamente y pueden contener mineralizaciones muy variadas, principalmente de Fe (magnetita), de sulfuros (Cu, Pb-Zn, Mo, etc), de W y de otros metales (Sn, Be, Au, U), siendo las más frecuentes las de magnetita, las de algunos sulfuros (Cu, Pb, Zn) con o sin Au y las de W (scheelita). El estudio de estos yacimientos ha dado lugar, tras interesantes discusiones, a una profundización de las teorías sobre el metasomatismo y de las interpretaciones genéticas correspondientes. Así, la extendida idea de que las formaciones de skarn son neumatolíticas -como sugiere alguno de los nombres tradicionalmente usados-, aceptable para los depósitos de alta temperatura (por ejemplo, de magnetita), es insuficiente para explicar otros yacimientos de skarn con sulfuros, en los que se aprecian dos fases, siendo la segunda (hidrotermal) la decisiva para la mineralización de sulfuros, que sustituyen a la paragénesis primitiva de skarn.

(I.3.)

Se ha indicado que los yacimientos hidrotermales son muy variados. En efecto, se definen de una forma muy general por haberse formado a partir de disoluciones acuosas diluidas, a temperaturas moderadas (~ 400 - 100°C). Numerosos metales de interés económico (Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Mn, Fe...) pueden encontrarse todavía disueltos en estas condiciones, concentrándose luego por diversos procesos.

⁸ Las albititas, como su nombre indica, son rocas graníticas enriquecidas metasomáticamente en el feldespato albita; el greisen –término empleado ya de antiguo por los mineros sajones- se compone principalmente de cuarzo y mica blanca.

Así la fracturación favorece el ascenso o emigración de estas disoluciones residuales que transportan metales y, eventualmente, la concentración y precipitación⁹ del material disuelto. Se originan así los típicos filones hidrotermales, con relleno de diversos minerales metálicos (mena) y de otros como cuarzo, carbonatos, barita o fluorita (ganga¹⁰), estables en las nuevas condiciones. La ganga puede tener también interés económico (barita, fluorita) cuando es abundante y pura; en todo caso, siendo su abundancia característica de los yacimientos hidrotermales, su interés metalogenético es indudable, por ayudar a definir las condiciones de formación. Además de los rellenos, las impregnaciones y sustituciones son frecuentes.

Según la temperatura de formación, se dividen los yacimientos hidrotermales en cata-, meso-, y epitermales (Fig. 3). En general, tal como indica la figura, las presiones suelen tener relación con las temperaturas, de acuerdo con la profundidad de formación (a mayor profundidad, mayores P y T): así el prefijo “hipo” (Lindgren), equivalente de cata-, indicaría simultáneamente P y T elevadas. Pero como dicha profundidad es variable, la relación también lo es: el querer fijar el par P-T en el cuadro de una clasificación lleva a complicaciones innecesarias¹¹.

Hay otros criterios, como el tipo morfológico, el nivel intrusivo, la relación con la fuente magmática (Fig.3) y la composición material / mineralógica (V. clasificación, Tabla 4). Este último permite una división lógica, en correspondencia con la naturaleza. Ha de indicarse que el orden con que se enumeran las formaciones hidrotermales en dicha clasificación (tabla 4) corresponde, a grandes rasgos¹², a T decreciente y que las dos últimas no siempre están en relación segura con una fuente magmática.

La dudosa relación de ciertos yacimientos hidrotermales con fuentes magmáticas ha dado lugar a numerosas polémicas que han marcado la trayectoria de las ideas metalogenéticas en la segunda mitad del siglo XX. Tal evolución se caracteriza por una mayor atención al papel desempeñado por los procesos sedimentarios. Así, algunos yacimientos estratoligados de Pb-Zn, considerados antes como “apogmáticos” (en lo que sería el grupo I.3.3. de la clasificación aquí utilizada), se relacionan hoy más con el ciclo sedimentario. Y otros como Río Tinto o, para algunos

⁹ La precipitación, producida al excederse el límite de solubilidad de la sustancia en cuestión, puede tener diversas causas, siendo la pérdida de solubilidad por enfriamiento, debido al ascenso de las disoluciones a zonas más someras, una de las más frecuentes.

¹⁰ El origen de la palabra ganga (del alemán Gang/art: “especie” de filón) es una clara alusión al frecuente carácter filoniano.

¹¹ Vbgr. la introducción, en América, de términos como “xenothermal” y “leptothermal” para acomodar en la clasificación de Lindgren yacimientos cuyas condiciones P-T no habían sido previstas.

¹² Hay excepciones, sobre todo en las formaciones subvolcánicas, como Sn-Ag-Bi (“telescoping” o superposición de paragénesis de diferentes T, a causa del rápido enfriamiento).

autores, Almadén se han desgajado del grupo de formaciones magmáticas hidrotermales de sulfuros cupríferos (I.3.2) o de Sb-Hg (I.3.6), respectivamente, para relacionarlos, asimismo, con dicho ciclo (yacimientos volcano-sedimentarios). Esto se explica por la existencia de diversos procesos, convergentes, transicionales entre los puramente magmáticos y sedimentarios.

(1.3.2)

Los pórfidos cupríferos (grupo I.3.2.), que contienen aproximadamente la mitad o más de las reservas mundiales de cobre y pueden ser también importantes por su contenido en oro, ofrecen otro ejemplo de convergencia. En efecto, la mineralización primaria (diseminación de pirita y sulfuros de cobre, principalmente calcopirita, con menas de Mo o de Au, según los casos), no suele ser excesivamente rica. Pero cuando se superponen procesos de alteración y de enriquecimiento secundario –sobre todo supergénicos, grupo III.1.1, cf. Figs. 4 y 7– pueden formar concentraciones de gran riqueza, especialmente por el enorme tonelaje, que permite beneficiar leyes pobres (por ejemplo 0.5%). La búsqueda de estos yacimientos ha de tener en cuenta tanto las alteraciones hipogénicas, como las supergénicas (Fig. 7), al ser ambas esenciales. La posición geotectónica y el nivel erosivo (Fig. 8) son también datos importantes para su investigación; el orógeno andino-circumpacífico reúne ingentes reservas cupríferas en yacimientos de este tipo (cf. Fig. 17).

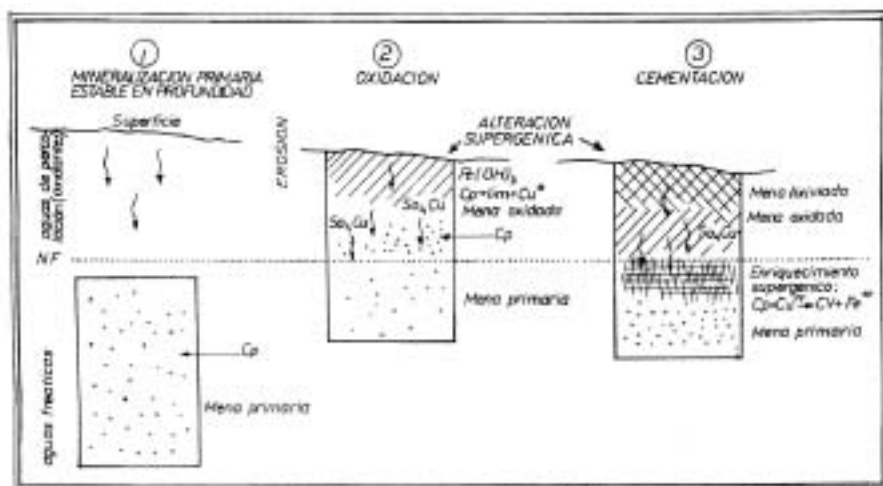


Fig. 7.- Evolución de un cuerpo mineralizado con calcopirita (cp) en ambiente superficial. Dicha evolución se ha representado, de forma sencilla, en tres etapas separadas; el paso 1-2-3 se produce naturalmente por erosión (desmantelamiento de la cobertera) y meteorización. El rectángulo con puntado representa la sección de una masa rocosa con una mineralización cuprífera (primaria) diseminada (por ejemplo, un pórfido cuprífero, como el de la Fig. 4). NF=nivel freático; cp=calcopirita; cv=covellina.

Yacimientos de la Serie metamórfica

6. YACIMIENTOS DE LA SERIE METAMÓRFICA

Al abordar el estudio de los yacimientos relacionados con los procesos metamórficos, suele hacerse una distinción elemental entre aquéllos cuyo origen se debe precisamente al metamorfismo (metamorfogénicos) y los que simplemente han sufrido cambios metamórficos, habiéndose formado con anterioridad (metamorfizados). La distinción se basa en la relación entre los procesos metamórficos y los de concentración de la mena: en el primer caso coinciden, en el segundo la concentración se había realizado previamente por otros procesos. La diferencia entre ambos tipos no siempre es clara, ya que las menas metálicas son muy sensibles al metamorfismo y, aunque lo hayan precedido, es fácil que sólo conserven la impronta del último proceso, adquiriendo enseguida un aspecto metamorfogénico.

Yacimientos complejos polimetamórficos son los que han sufrido metamorfismo durante varios acontecimientos orogénicos, a veces con una extremada intensidad, hasta el punto de que puede desaparecer todo rasgo genético anterior; en estos casos, no es raro que se encuentren asociados a fenómenos magmáticos y palinogénicos propios de condiciones catazonales.

El metamorfismo puede dar lugar a cambios morfológicos y paragenéticos, así como a removilizaciones y sustituciones (Fig. 16). Los cambios morfológicos se producen a diferentes escalas:

- Cambios en la forma externa del yacimiento, cuando hay efectos dinámicos: por ejemplo éste puede comportarse como un cuerpo incompetente (poco resistente a la deformación) o responder al esfuerzo de forma diferenciada, a causa de la plasticidad de ciertos minerales (como galena) o de la heterogeneidad mineralógica (pirita, rígida, frente a galena o ganga arcillosa, más dúctiles), respectivamente.
- Cambios meso- y microscópicos, especialmente texturales: así los sulfuros recrystalizan con gran facilidad, a veces sin dejar siquiera un leve rastro de las formas primitivas, a diferencia de los silicatos de las rocas comunes, que son más resistentes y que, por tanto, brindan más oportunidades para reconstruir su historia geológica y descifrar su origen.

Los cambios paragenéticos se deben a la inestabilidad de las asociaciones minerales primitivas en las nuevas condiciones. Una observación en apariencia

sorprendente es el hallazgo de paragénesis hidrotermales en rocas que han sufrido intenso metamorfismo (catazonales); no obstante, el papel de la presión elevada puede explicar la persistencia de sulfuros y arseniuros aun en esas condiciones. En general, es de esperar que los minerales menos densos y más hidratados cedan su lugar a otros más densos y menos hidratados (por ejemplo, la limonita pasa a magnetita), al aumentar la intensidad del metamorfismo.

El metamorfismo puede originar también removilizaciones, a causa de los fluidos -sobre todo hidrotermales- desplazados, que pueden llevar en disolución iones metálicos, pero también, a más pequeña escala, a causa de la plasticidad de ciertos sulfuros como la galena, que frecuentemente cementa o rellena fracturillas en otras menas más rígidas, como pirita, pudiendo dar la falsa impresión de reemplazamientos. Y la misma pirita puede llegar a adquirir un comportamiento dúctil en ciertas condiciones, como se ha demostrado experimentalmente, a temperaturas y presiones suficientemente altas.

Las disoluciones activas, finalmente, pueden dar lugar a procesos de sustitución o metasomatismo, los cuales pueden intervenir en la formación de yacimientos, igual que los procesos isoquímicos (cambios texturales y mineralógicos, por los cuales la roca se adapta a las nuevas condiciones de P y T, pero sin variaciones fundamentales en la composición química, excepto la circulación o expulsión de fluidos, acuosos fundamentalmente).

(II.1)

El metamorfismo de contacto -originado por una intrusión magmática próxima, Fig. 2- produce en principio un efecto térmico, pero también va a menudo asociado a emanaciones hidrotermales o hipercríticas que dan lugar a importantes cambios en las rocas inmediatas. En este segundo caso se originan yacimientos de gran interés, que ya han sido mencionados en relación con la serie magmática (apartado I.2.3, yacimientos pneumatolíticos de contacto o de skarn), aunque generalmente se trata de formaciones metamorfogénicas peculiares (metasomáticas). En el primero, los cambios producidos no suelen tener gran trascendencia económica. No obstante, algunos de ellos merecen atención, como la transformación de hidróxidos, carbonatados y óxidos de hierro en magnetita, cuyo tamaño de grano aumenta además con el metamorfismo (recristalización), con lo que puede mejorar el comportamiento mineralúrgico de la mena (reducción de eventuales gastos de molienda).

De la misma manera, se pueden transformar menas (hidr) oxidadas de Mn (se produce braunita, hausmanita, etc.) y de Al (formación de corindón). Las menas sulfuradas sufren recristalización y cambios mineralógicos, como la transformación -en sí poco trascendente económicamente- de pirita en pirrotina. A partir de rocas carbonosas y bituminosas se puede formar grafito.

(II.2)

El metamorfismo regional se caracteriza por un aumento de presión asociado al incremento térmico, en un amplio ámbito de la corteza. La presión litostática, que actúa en todas direcciones y, naturalmente, depende de la profundidad, favorece la formación de paragénesis que ocupan menos volumen, es decir, más densas; en algunos casos, con marcado –o exclusivo– predominio de este tipo de presión, pueden conservarse, a pesar de un intenso metamorfismo estático, las estructuras microscópicas originales de la mena, en forma residual, como sucede en algunos yacimientos de hierro (Ouro Preto, Brasil).

La presión dirigida, propia del metamorfismo dinámico y del regional dinamo-térmico, produce efectos mucho más notables. La mayor parte de las menas metálicas responden rápidamente a los esfuerzos mecánicos, pero el comportamiento depende de varios factores: la duración (cuanto más instantánea es la aplicación del esfuerzo, mayor es la probabilidad de fractura), la temperatura (su aumento reduce la fragilidad), la profundidad y, ante todo, la naturaleza del mineral. Así, pirita, arsenopirita y cromita tienden a la cataclasis (fragmentación), por su carácter rígido, mientras que la pirrotina y blenda son más deformables y galena y calcopirita se comportan plásticamente. En todo caso, la multiplicación de superficies activas, causadas ya sea por deformación o traslación intracrystalina, ya por fracturación, incrementa la capacidad de reacción del mineral; éste tiende a disolverse en las zonas de mayor presión, lo que permite el transporte, y precipita en zonas de descompresión (fracturas, etc.), resultando el proceso conocido como transferencia por disolución (“solution transfer”); existen otros mecanismos que conducen a la precipitación, como la reacción de las disoluciones con rocas de composición adecuada.

La influencia de la profundidad y de la intensidad del metamorfismo no se expresa en las paragénesis metálicas, como en las de silicatos, por una serie de zonas metamórficas, separadas por isogradas. Por el contrario, en zonas de condiciones muy diferentes pueden encontrarse paragénesis con amplias similitudes; así en un yacimiento catazonal como el de Broken Hill (Australia) es dominante la galena, que también se forma en condiciones sedimentarias (por ejemplo, en Sierra de Gádor, Almería, España) o superficiales. No obstante, hay una tendencia al empobrecimiento en S y en O, a medida que aumenta la intensidad metamórfica (transformaciones como: pirita->pirrotina; hematites->magnetita; pirolusita->braunita->hausmannita). Simultáneamente, la materia orgánica eventualmente presente sufre un proceso de “grafitización”. La aparición de hematites especular se ve favorecida por la acción de presiones dirigidas, según algunos autores. Las observaciones microscópicas (texturas, intercrecimientos, sustituciones, etc.) son, evidentemente, también ahora una útil ayuda para la interpretación genética; igual que en las rocas comunes, se observa también en las menas metálicas un aumento del tamaño de grano con intensidad de metamorfismo creciente.

El metamorfismo presenta especial interés, como proceso generador de yacimientos, cuando se superpone a pre-concentraciones sedimentarias de baja ley, como ocurre con diversas formaciones de hierro y de manganeso, las cuales se enriquecen por transformaciones como las del párrafo precedente, en las que domina la deshidratación y/o una relativa reducción. Formaciones como las itabiritas (ferríferas) y gonditas (manganíferas), muy bien representadas en Brasil y en la India, respectivamente, son mundialmente conocidas; la región del lago Superior (USA), con sus jaspilitas y taconitas (cuarcitas bandeadas con hematites) tiene también importantes reservas. Este tipo de yacimientos (BIF y BMF o Formaciones Bandeadas de Hierro y de Manganeso, respectivamente) es frecuente en escudos precámbricos. Pero donde destaca particularmente el papel del metamorfismo es en la generación de los yacimientos orogénicos de oro, actualmente de importancia primordial a escala mundial; las concentraciones de este tipo han recibido diferentes nombres (Archaean gold, gold only, mesothermal gold, metamorphic gold, vein-type gold...deposits), pero comparten procesos y modelos comunes, como el activo papel del metamorfismo dinámico.

(II.3)

Entre los yacimientos complejos polimetamórficos, típicos de escudos precámbricos, la mejor muestra es quizá el de Broken Hill (N.S. Wales, Australia), tan impresionante por su riqueza en Pb-Zn (Ag) como por sus reservas –se trata de una de las mayores acumulaciones metálicas conocidas en la litosfera-, que encaja, concordantemente, en rocas catazonales (predominantemente para-gneises silimaníticos) precámbricas, intensamente replegadas y tectonizadas.

Su origen fue muy discutido, ya que la extrema intensidad del metamorfismo - con recristalizaciones simultáneas de silicatos y sulfuros- acompañado de palingénesis incipiente (formación de pegmatitas, granitización) y de removilizaciones, hizo pensar primordialmente en procesos endógenos metasomáticos (epigenéticos), controlados tectónicamente -las fallas servirían de vías de acceso a las disoluciones- pero hoy en día han ganado crédito las interpretaciones singenéticas. En efecto, no es fácil explicar cómo los enormes volúmenes de roca, sustituidos según las hipótesis metasomáticas, habrían podido ser eliminados; asimismo, la asociación concordante con para-rocas ¹³ y el carácter bandeado, así como el control estratigráfico, son otros argumentos a favor de las nuevas interpretaciones, que suponen que los sulfuros se formaron con los sedimentos antepaleozoicos y fueron plegados y metamorfozados –la recristalización borra las texturas primitivas- con ellos.

¹³ Se designan como para-rocas las rocas metamórficas de origen sedimentario. Cuando las rocas metamórficas son de origen ígneo reciben el nombre de orto-rocas.

Yacimientos de la Serie sedimentaria

7.- YACIMIENTOS DE LA SERIE SEDIMENTARIA

Se refiere este apartado a los yacimientos cuyos principales procesos de concentración se sitúan en el ciclo geodinámico externo. Son mineralizaciones formadas, como las rocas sedimentarias, en la parte superficial de la corteza terrestre. La combinación favorable de los procesos exógenos esenciales determina las posibilidades de concentración y, por tanto, los tipos de yacimientos originados en el ciclo sedimentario. Estos procesos son: erosión, alteración supergénica / meteorización, transporte (en disolución o mecánico) y deposición (mecánica o por precipitación química). La compactación y la litificación / diagénesis de los sedimentos juegan también un papel importante en algunos casos.

El orden seguido en la presentación de estos yacimientos (v. clasificación Tabla 4) corresponde en cierto sentido al de la actuación de los agentes naturales (fig.4). Una concentración mineral sometida a la acción de los agentes meteóricos sufre procesos de alteración y ciertos metales disueltos, arrastrados por aguas percolantes, pueden precipitar en zonas algo más profundas y formar concentraciones descendentes. Lo mismo sucede con algunas rocas que originalmente contienen concentraciones muy escasas en metales poco solubles (Al, Ni); si por un proceso continuado e intenso de alteración y erosión se elimina un gran volumen de componentes rocosos solubles (móviles) resultan concentraciones residuales, in situ, de los compuestos insolubles o inmóviles (oxidados) de dichos metales, las cuales pueden tener interés económico. Los minerales resistentes a la erosión por su dureza y estabilidad química ("resistatos") no se alteran, pueden ser movilizados por la acción de la gravedad, por el viento, o sobre todo por las aguas superficiales, hasta lugares en que la energía del agente de transporte disminuye: así se forman yacimientos detríticos o placeres. Estos tres procesos (III.1 a. 3.) son importantes para la concentración del oro en medios superficiales. Finalmente, los metales disueltos en aguas de escorrentía –o subterráneas- se pueden desplazar como fluidos a grandes distancias, hasta que los cambios en las condiciones físico-químicas del medio los precipitan: yacimientos de precipitación química; como caso especial suelen distinguirse los producidos por la precipitación de las sales de los metales normalmente contenidos en el agua marina, en una cuenca restringida (depósitos evaporíticos).

Como puede verse, los efectos directos de la meteorización (alteración supergénica) predominan en las concentraciones mencionadas al principio, mientras que los del transporte –y finalmente de la precipitación química - van adquiriendo paulatinamente una relevancia mayor en las siguientes. La precipitación de los depósitos

tos evaporíticos está condicionada por los aportes y por la evaporación del agua del mar. Los procesos diagenéticos hacen sentir su influencia sobre todo en los yacimientos de precipitación química y bioquímica, en los que no siempre es posible establecer un proceso genético exclusivo.

(III.5)

Los yacimientos exhalativos submarinos, de origen volcano-sedimentario, son un caso especial, de transición. Los aportes metálicos suelen ser endógenos, es decir, procedentes de rocas endógenas, aunque probablemente lixiviados por disoluciones hidrotermales de origen exógeno/marino, en la mayor parte de los casos. Pero la concentración y precipitación están regidas por las condiciones de la cuenca sedimentaria y los minerales metálicos son singenéticos con respecto a las rocas de dicha cuenca, por lo que parece más conveniente tratarlos dentro de este grupo. Aun así, las concentraciones metálicas y alteraciones hidrotermales en las zonas de raíz (feeder o stockwork) responden más al clásico modelo epigenético hidrotermal de la serie magmática. La actual denominación de VMS (Volcanogenic Massive Sulfides) en la literatura internacional (SMV o Sulfuros Masivos Volcanogénicos, en castellano) parece un compromiso razonable para describir esta realidad, caracterizada por la convergencia de procesos y ámbitos diferentes.

A partir de las ideas de Goldschmidt, atendiendo al carácter de los productos finales más que al transporte y concentración, se ha extendido la terminología: residuos, resistatos, oxidatos, hidrolizados, carbonatos, evaporatos, reduzatos, cuyo significado, implícito en cada nombre (Fig. 4), es fácilmente comprensible. Ésta no es, sin embargo, la línea de exposición seguida aquí, ya que podría distraer la atención de los procesos generadores esenciales.

(III.1.1)

Los procesos de alteración superficial y meteorización son los decisivos, según se ha visto, para la formación de concentraciones descendentes, cementativas (sulfuros) u oxidadas (Fig. 8). Los sulfuros metálicos, sometidos a oxidación en condiciones superficiales, sufren un proceso de alteración selectiva y de concentración diferencial, muy interesante económicamente. Esto es muy fácil de comprender, considerando como ejemplo ilustrativo el comportamiento del par Cu-Fe, componentes de la calcopirita: el Cu es soluble en ambiente oxidante y es fácilmente arrastrado por las aguas descendentes (aunque una parte sea retenida, dando a las rocas sus llamativos colores: malaquita, azurita, crisocola, etc.); el Fe, en cambio, precipita enseguida, al oxidarse en ambiente superficial, ya que el ión Fe^{+++} es insoluble, a no ser que las condiciones sean muy ácidas. Así se origina en superficie una montera ferruginosa ("gossan"), de color pardo, característica de la zona de oxidación, que puede ser una buena guía para el investigador y que a veces tiene concentraciones de interés económico (por ejemplo, puede precipitar oro y plata nativos).

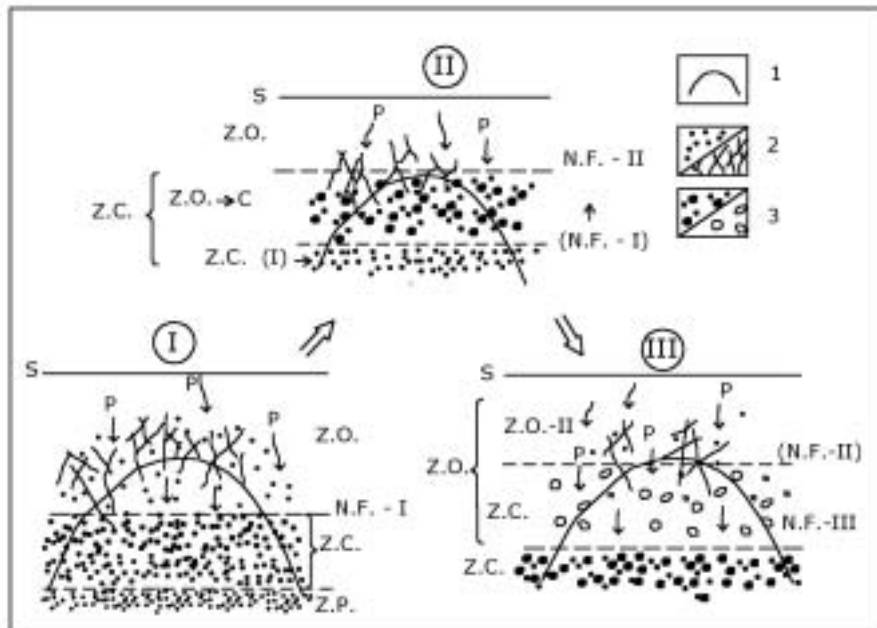


Fig. 8.- Procesos exogénicos de concentración. Pórfido cuprífero: 1 Pórfido. 2 Mena primaria: diseminada/en vetas. 3 Mena secundaria (cementativa/lixiviada). I Zonas iniciales de alteración y de enriquecimiento supergénicos (Z.O.=zona de oxidación; Z.C.= zona de cementación; Z.P. = zona de mena primaria); S= superficie; NF=nivel freático; P= aguas percolantes. II Modificación por ascenso del nivel freático al nivel II (NF-II): una parte de la zona de oxidación se enriquece supergénicamente por cementación (Z.O.-C). III Íd. por descenso del NF: la parte de la zona enriquecida supergénicamente que queda por encima del actual nivel (NF-III) sufre oxidación (Z.C.-O), con lo que sus menas de sulfuros se empobrecen (lixiviación), pasando a concentrarse por debajo del NF-III en la nueva zona de cementación (ZC).

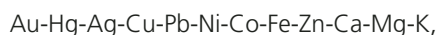
Al descender, las disoluciones van encontrando condiciones cada vez más reductoras; superado el nivel freático ya no es posible la oxidación, invirtiéndose el proceso, ya que el Cu es insoluble como sulfuro, mientras que, por el contrario, el Fe es soluble si las condiciones no son muy oxidantes, es decir, en forma ferrosa (Fe^{++}), por lo que puede pasar a disolución en su lugar. Como dichas disoluciones descendentes entran en contacto en estas zonas más profundas con calcopirita fresca, ésta se vuelve inestable y es reemplazada por calcosina o covellina, según reacciones como:



Una simple comparación del contenido en cobre de los minerales primarios (calcopirita: 34.5%) y secundarios (covellina: 66.5%; calcosina: 79.9%) da idea de la trascendencia económica del proceso (enriquecimiento secundario), que es funda-

mental en mineralizaciones diseminadas, con baja ley pero altos tonelajes contenidos, como los pórfidos cupríferos (I.3.2.). El contenido económico es, en este caso, fruto de la convergencia de procesos hipo- y supergénicos.

Esto sucede no solamente con el Cu y con el Fe, sino con otros metales también: la explicación radica en las distintas solubilidades de los diferentes componentes metálicos en las condiciones de cada zona. En la serie:



Cualquier metal es desplazado de sus disoluciones sulfatadas –es decir, precipitado en la zona de cementación– por otro menos noble que él –es decir, posterior en la serie–; así, por ejemplo, es frecuente la sustitución de galena por calcosina o covellina:



La sustitución de pirita por los mismos minerales es más fácil e interesante económicamente. El hecho de que el Fe esté casi al final de la serie es importante, ya que los minerales ferríferos son muy comunes y poco valiosos, pero pueden hacer precipitar otros más apreciados. Naturalmente, intervienen también otros factores que hacen que la realidad sea algo más compleja: la mineralogía de la zona de cementación –como en la de oxidación– suele ser plural y complicada.

El enriquecimiento secundario de la zona de cementación es especialmente relevante para los sulfuros de Cu y Ag, que son muy poco solubles, mientras que con sus sulfatos sucede lo contrario. La situación de la zona de cementación depende de la posición del nivel hidrostático y se ve afectada por sus variaciones, lo que es de vital importancia y ha de tenerse en cuenta en la exploración (Fig. 8).

(III.1.2.)

Los procesos de enriquecimiento ligados a disoluciones descendentes no son exclusivos de los yacimientos de sulfuros. Los yacimientos infiltrativos, frecuentes en menas de Fe y Mn, se originan de forma parecida –cambian los metales concentrados y el tipo de reacciones–, a partir de concentraciones superficiales, incluso muy débiles, pero extensas. En la Fig. 9 se ilustra la formación de un yacimiento de hierro de este tipo, ligado a procesos descendentes y kársticos; son típicos de estos depósitos, claramente epigenéticos, el transporte y precipitación coloidales, las formas lobuladas de reemplazamiento y el relleno de brechas de colapso en las calizas.

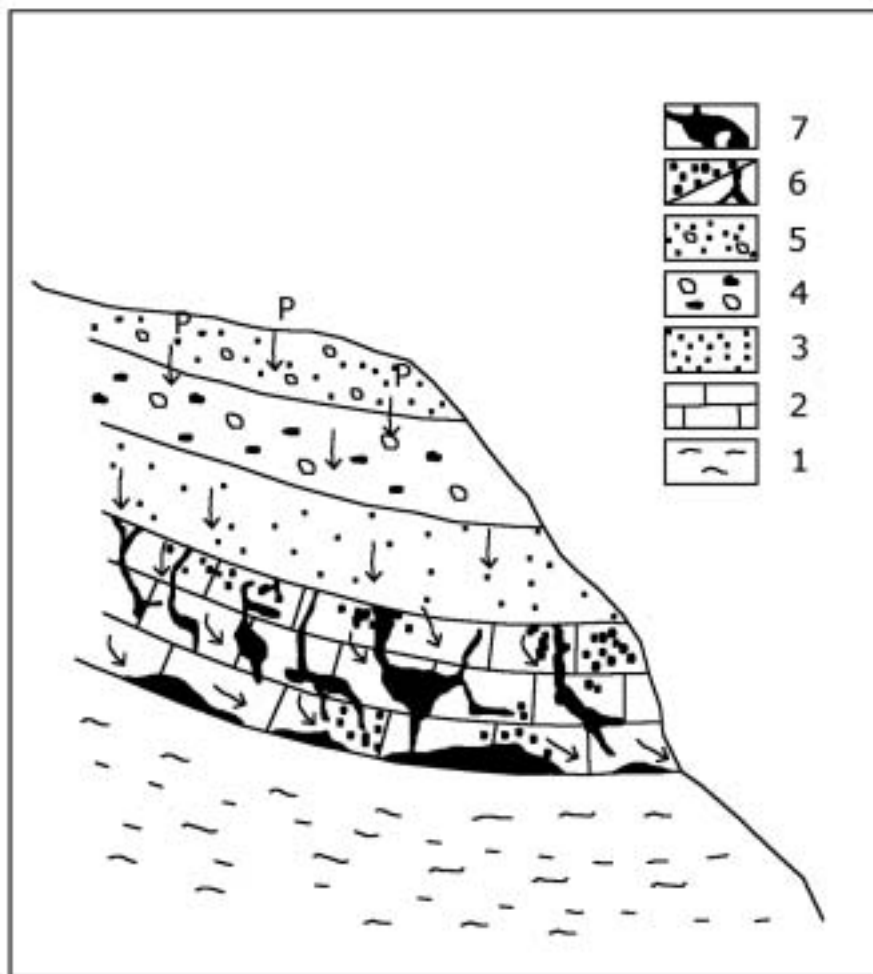


Fig. 9.- Procesos exogénicos de concentración. Yacimiento infiltrativo de hierro: 1 Esquistos (impermeables). 2 Calizas. 3 Areniscas. 4 Conglomerados ferruginosos. 5 Conglomerados y areniscas. Menas ferríferas: 6 diseminada/en fracturas: 7 en bolsadas o lentejones. P= aguas percolantes.

Procesos similares –en variadas litologías- pueden originar diversas concentraciones metálicas de interés económico, por ejemplo diversas concentraciones uraníferas (Fig. 10).

En los grupos III.2 y III.3 tienen ya mayor magnitud los procesos de transporte que pueden contribuir al enriquecimiento, ya sea eliminando la ganga, ya concentrando mecánicamente la mena.

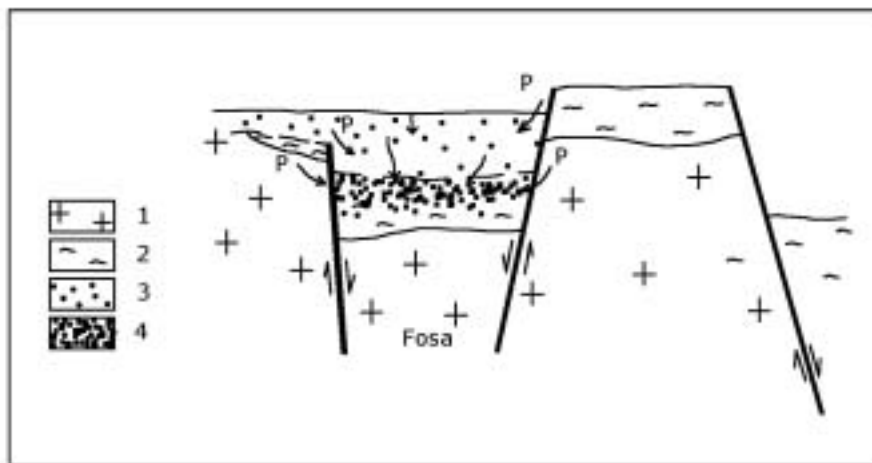


Fig. 10.- Procesos exogénicos de concentración. Concentración supergénica de U, por reducción, a partir de disseminaciones superficiales, disueltas y transportadas por aguas descendentes (P). Nótese el control tectónico. (Modificado de Fernández Polo, 1970; haciendo abstracción de los datos locales y de la escala, el modelo –propuesto para la Mina Fe, Salamanca- podría aplicarse también a algunos de los procesos genéticos de yacimientos del tipo “Colorado Plateau”, v. texto). 1 Granito (hercínico). 2 Pizarras negras (pre-hercínicas). 3 Sedimentos miocenos. 4 Zona de concentración en pizarras (oxidación escasa o reducción).

(III.2.)

Los yacimientos residuales –Fig. 11- tienen en común con los precedentes la precipitación descendente, en formas oxidadas (hidróxidos, silicatos). No obstante, en éstos la concentración de la mena, cuyo comportamiento es más pasivo, es efecto indirecto de la meteorización, ya que se debe a la eliminación – por meteorización y transporte en disolución – de la ganga, es decir, de los demás componentes, que constituían la mayor parte de la roca ¹⁴. Por ello su formación se ve favorecida por un clima húmedo y cálido y está condicionada, evidentemente, por el drenaje y la erosión. Las formaciones bauxíticas y lateríticas de zonas tropicales son ejemplos típicos y las menas de Al, Ni, (Au, Co), las más comunes en este tipo de depósitos. Todos ellos proceden de rocas con bajos contenidos metálicos, por lo que es necesaria la alteración de grandes volúmenes de éstas, para producir concentraciones económicas.

¹⁴ Otra diferencia es, por tanto, el carácter “singenético” e “indígena” –procedente de la misma roca- de la mena con respecto a los minerales –de alteración- que la acompañan en el caso de las concentraciones residuales, frente al carácter epigenético y frecuentemente “forastero” –de origen exterior a la roca- de las menas infiltrativas

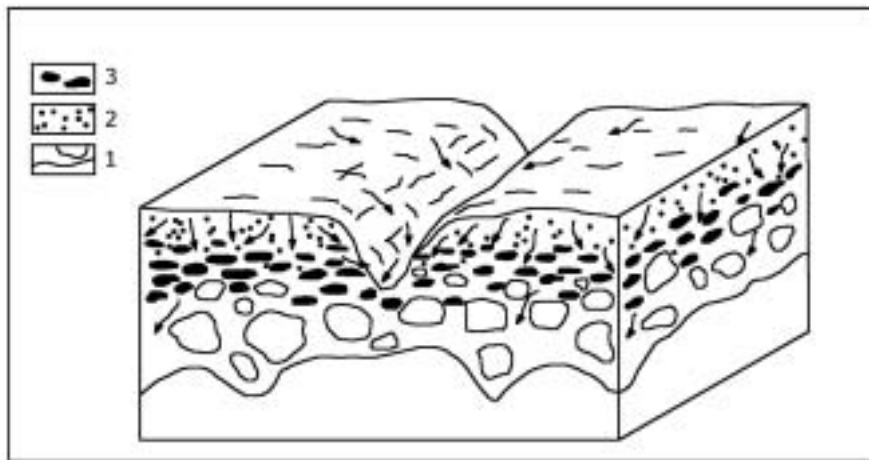


Fig. 11.- Procesos exogénicos de concentración. Enriquecimiento residual (de Ni). 1 Roca primaria (peridotita). 2 Zona de alteración (laterita). 3 Concentración metálica. Nótese el riesgo de desmantelamiento por erosión (mecánica), debido a la escasa consistencia de los materiales alterados.

(III.3)

Los minerales duros y estables químicamente pueden acumularse también en concentraciones residuales (placers eluviales, transición entre los grupos III.2 y III.3), pero, por efecto del transporte (placers coluviales y sobre todo, aluviales, Fig. 12) llegan a reunirse tonelajes mayores y/o leyes más interesantes, gracias a la concentración selectiva que se opera en las fracciones detríticas arrastradas por corrientes de agua: los granos más densos –en general, los más interesantes económicamente- y mayores se depositan antes que los más ligeros y finos, respectivamente.

Este carácter polar del transporte mecánico proporciona un buen criterio para la prospección, igual que el conocimiento de las posibles “trampas” (meandros, irregularidades del cauce, Fig. 12), que producen una disminución de la energía de las corrientes, favoreciendo, por consiguiente, la deposición de los minerales pesados.

Éstos, además de la densidad y de la estabilidad química, han de reunir otra cualidad para dar lugar a concentraciones importantes: resistencia mecánica. Los minerales demasiado blandos o frágiles se fragmentarán rápidamente y no resultarán naturalmente concentrables. El oro es un caso especial porque a pesar de su escasa dureza, es maleable (no frágil), estable y muy pesado y por ello se concentra bien.

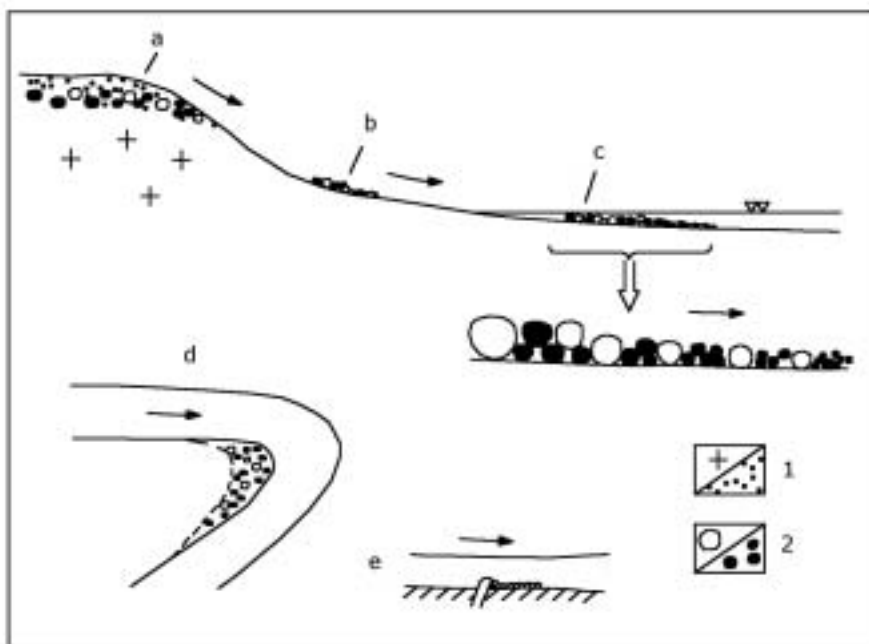


Fig. 12.- Procesos exogénicos de concentración. Formación de placeres. a: eluviales; b: coluviales; c: aluviales (obsérvese concentración selectiva). La flecha indica el sentido de la corriente. Trampas: d-meandro; e-lecho irregular. 1 Roca: primaria (p.ej. granito)/alterada. 2 Minerales detríticos concentrados: ligeros /densos.

Son importantes los minerales de interés económico que reúnen estas condiciones en grado suficiente y son hoy beneficiados: casiterita -los placeres estanníferos del Sudeste Asiático han registrado 2/3 de la producción mundial de este metal-, columbita, tantalita, scheelita, diamante y otras piedras preciosas, monazita, rutilo, circón, cromita, oro, platino y elementos del grupo del platino (EGP), uraninita, minerales de tierras raras.

Buena parte del valor minero de los placeres se debe a los escasos gastos de extracción, por tratarse de material no consolidado. Pero por esta misma razón, son fácil presa de la erosión y por ello no suelen encontrarse en rocas pre-terciarias, aunque hay notables excepciones, como los conglomerados precámbricos (metamorfizados) de Witwatersrand (R. Sudafricana), fabulosos por su riqueza en Au y U. Debido a sus condiciones de formación, los paleo-placeres / placeres se encuentran tanto en plataformas como en zonas orogénicas (ejemplo Witwatersrand y S. E. Asiático, respectivamente).

(III.4.)

Finalmente, la fracción disuelta puede recorrer grandes distancias hasta que el cambio de condiciones físico-químicas da lugar a la precipitación de los iones. Los procesos de transporte no están todavía totalmente explicados, pero parece ser que es importante la formación de coloides en muchos casos.

Los yacimientos aquí designados, simplemente, como de precipitación química son muy variados (Figs. 13 y 14). Se ha optado por hacer tres grandes subdivisiones, atendiendo al entorno geológico que condiciona los procesos generadores, a fin de lograr una visión de conjunto, sin perder de vista dichos procesos:

- 1.- Precipitación en medio continental
- 2.- Precipitación en medio litoral o sub-acuático
- 3.- Precipitación en fondos oceánicos

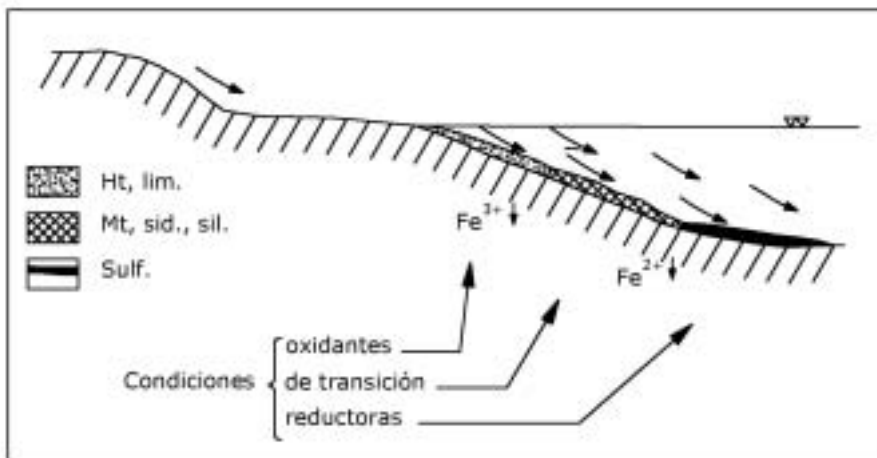


Fig. 13.- Procesos exogénicos de concentración. Precipitación sedimentaria de hierro (corte esquemático perpendicular a la línea de costa). Obsérvese la zonalidad, condicionada por la distancia a la línea de costa, en relación con la evolución de las condiciones físico-químicas (sobre todo: variación del Eh del medio). Menas: Ht=hematita, lim=limonita, Mt=magnetita, sid=siderita, sil=silicatos (chamosita, thuringita...), sulf = sulfuros (pirita, marcasita...). Esta secuencia zonal raramente se encuentra completa.

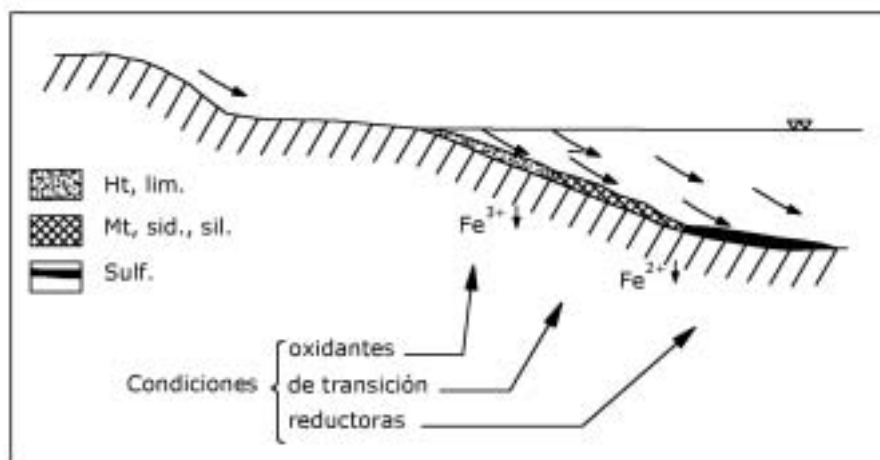


Fig. 14- Procesos exogénicos de concentración. Modelo de formación singenética de yacimientos sedimentarios de Pb-Zn en rocas carbonatadas. I Concentración en cuencas litorales, con circulación restringida. II Precipitación sedimentaria, en ambiente reductor –materia orgánica-, de sulfuros (galena, esfalerita; con marcasita, pirita, calcopirita... según la disponibilidad de Fe y Cu), formando diseminaciones y cuerpos estratiformes que quedarán sepultados bajo los sedimentos posteriores y sufrirán diagénesis. III Comportamiento de las menas ante un eventual plegamiento; deformaciones, relleno de fracturas –especialmente galena, por su plasticidad-, posibles removilizaciones hidrotermales. IV Aspecto epigenético de una parte de las menas afectadas por una intensa tectónica, coexistiendo con menas estratiformes y con diseminaciones primarias (singenéticas). (Las etapas III y IV, evidentemente, son casos particulares, que enmascaran los procesos originarios, y no siempre se dan). 1 Dolomías/calizas. 2 Menas primarias: estratiformes/diseminadas. 3 Mineralizaciones filonianas (relleno de fracturas y fallas)/alteraciones hidrotermales (silicificación).

(III.5)

Los yacimientos exhalativos submarinos, de origen volcano-sedimentario, tienen gran significado económico (Cu, Zn, Pb, Au, Ag, Mn, Hg...). Pueden considerarse, desde la perspectiva de una línea evolutiva, como un término en el que la relación entre los procesos generadores de tipo magmático – hidrotermal y de tipo sedimentario es ya franca y hoy aceptada, tras no pocas discusiones, por todos: aportes magmáticos que desembocan en cuencas sedimentarias, con ambiente reductor, dando lugar a la precipitación de sulfuros metálicos (Figs. 15 y 16); el azufre puede ser, en parte al menos, organógeno. Las menas son sulfuros (pirita, calcopirita, galena, etc.), con sulfosales muy subordinadas y con metales preciosos (oro y plata, generalmente como sub-productos), pero también se originan de este modo otros yacimientos (por ejemplo, óxidos y carbonatos de Fe y Mn).

Los ejemplos son abundantes en todo el mundo y en diferentes épocas, desde los precámbricos hasta los actuales “black smokers” suboceánicos, pasando por los paleozoicos –vbgr. los excepcionales yacimientos de la Faja Pirítica Ibérica, que con sus más de 1000 millones de toneladas estimadas constituye la más importante provincia metalogenética de este tipo en todo el mundo: Río Tinto, Tharsis,

Neves Corvo, etc., en el SO de España y S de Portugal- o más recientes (como los de Kuroko, Japón). Existen diversos subtipos, según su asociación litológica (máfica, ácida, bimodal...), su geoquímica, su contenido metálico y su posición geotectónica, por ejemplo en zonas orogénicas o no deformados, ligados a dorsales oceánicas o en cuencas marginales, desarrollados sobre corteza continental u obducidos como complejos ofiolíticos.

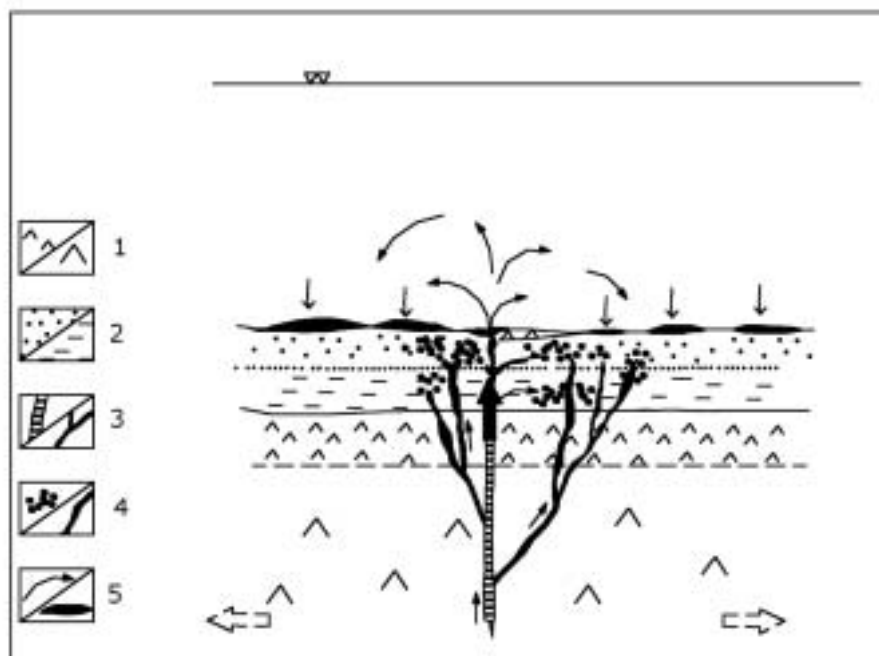


Fig. 15.- Procesos exogénicos de concentración. Modelo de formación de yacimientos hidrotermales y sedimentarios en relación con fracturas oceánicas, a partir de observaciones sobre las metalizaciones de las dorsales oceánicas, del Mar Rojo, etc. (v. texto). 1 Rocas magmáticas: de la corteza oceánica (basalto)/del manto superior (peridotita). 2 Sedimentos. 3 Canales de aporte: conducto volcánico/fracturas con circulación de disoluciones hidrotermales. 4 Metalizaciones (Cu, Fe, Mn...): impregnación/relleno filoniano. 5 Emanaciones con aportes metálicos en medio acuoso /concentraciones volcano-sedimentarias.

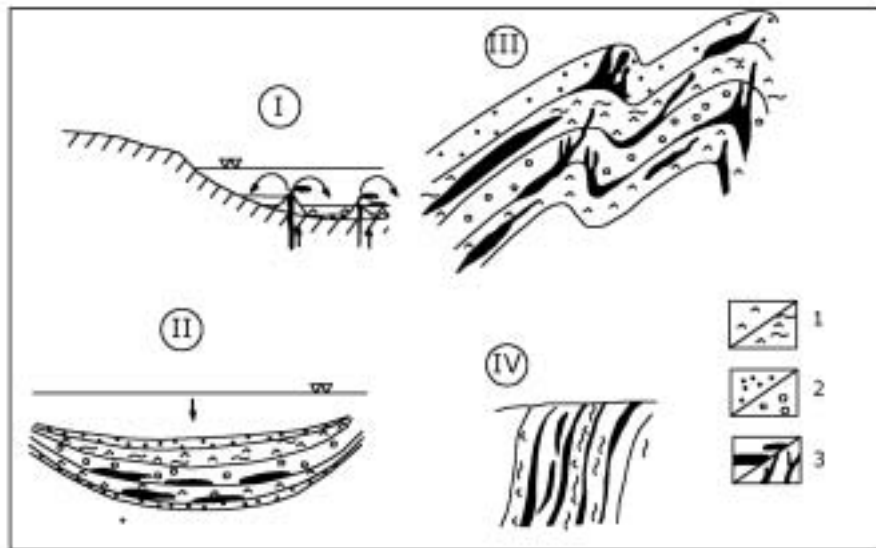


Fig. 16.- Procesos exogénicos de concentración. Evolución de depósitos volcano-sedimentarios. I aportes volcánicos en el fondo submarino y precipitación de sulfuros volcano-sedimentarios (como fig.15). II Subsistencia de la cuenca y diagénesis. III Plegamiento y metamorfismo. IV Yacimientos modificados por metamorfismo catázonal, en su posición actual (ej. yacimientos de sulfuros cupríferos del NW de la península Ibérica: Arinteiro, Fornás...). Las etapas III y IV, como en la Fig. 14, no son generales. En ambientes actuales, por ejemplo en dorsales oceánicas y en el Mar Rojo, existen concentraciones metálicas que todavía no han sufrido la etapa II. 1 Rocas: volcánicas / metamórficas. 2 Depósitos de geosinclinal. 3 Menas: cuerpos estratiformes / id. deformados y menas removilizadas.

Síntesis sobre la Formación de yacimientos

8. SÍNTESIS SOBRE LA FORMACIÓN DE YACIMIENTOS DESDE UNA PERSPECTIVA GLOBAL

Una serie de hechos de carácter evolutivo y alcance amplio han atraído desde siempre la atención de los metalogenistas. Por ejemplo: ¿Por qué las Formaciones Bandeadas de Hierro o Banded Iron Formations, BIF (III.4.2), se encuentran sólo en el Precámbrico?. ¿Por qué los “pórfidos cupríferos” (I.3.2.) abundan tanto en lo que –por el gran número de volcanes y terremotos– se conocía tradicionalmente como “cinturón de fuego” del Pacífico (Fig.17)? ¿Por qué durante el Pérmico o durante el Carbonífero se formaron en Europa muchos más yacimientos que en el Cretácico o en el Devónico?. ¿Por qué ciertos tipos de depósitos aparecen predominantemente, según se ha visto, en cratones, otros en zonas móviles (orogénicas) y algunos otros, en ambas? O bien, desde un punto de vista más práctico (Routhier, 1983): ¿dónde están los metales para el futuro?

En parte, cuestiones como éstas quedan respondidas al leer, con un criterio geológico, las páginas precedentes. Así, por ejemplo, la abundancia de yacimientos hidrotermales en diversos ámbitos geotectónicos se explica por la variedad de circunstancias en que pueden originarse (diferentes procesos magmáticos, metamórficos, etc). Análogamente la distribución regional de diversas formaciones es posible explicarla según las teorías orogénicas tradicionales -y así se ha hecho, Tabla 6-, ya que cada formación se relaciona con una fase y con un ámbito determinado del desarrollo geosinclinal: los que ofrecen condiciones para su génesis. Por ello, para conocer las posibilidades metalogenéticas de una región, se ha de tener en cuenta su historia geotectónica, que condiciona el ámbito generador. Pero, tras el estudio de los procesos de concentración particulares en los distintos tipos de yacimientos, se plantea la necesidad de relacionar entre sí todos estos conocimientos desde la perspectiva que proporciona un nivel superior o más general de información. La escala para esta observación de síntesis alcanza a la totalidad de la corteza terrestre: es ya global.

ESTADIO	MAGMATISMO	FORMACIONES	YACIMIENTOS
I Geosinclinal	Inicial (simático-juvenil)	<u>Magmáticas:</u> - Efusivas submarinas: espilita-keratófido - Intrusivas: Periodita Gabro-piroxenita-dunita Plagiogranito-sienita <u>Sedimentarias:</u> - Sedimentos clásticos - Carbonatadas - Charnosíticas - Síliceas - Bituminosas	Ídulos sulfuros (Cu, Pb, Zn) y óxidos (Fe, Mn) volcano-sedimentarios Cr, Os, Ir (magmáticos) Fe, Ti, Pt, Pd (magmáticos) Skarn (Fe, Cu) Conglomerados, areniscas, arcillas Óxidos y carbonatos de Fe-Mn; fosforitas, calizas Menas silicatadas de Fe y Mn Menas pobres de Fe/Mn Diseminaciones de materia orgánica, con sulfuros (Fe, Cu, Zn, Mo) y óxidos (U, V)
II Orogénico	Sin-y tardi-orogénico (siálco-palínogenético dominante) Plutonismo dominante	<u>Magmáticas:</u> - Efusivas: Ignimbriticas, dacit—riolitas - Intrusivas: Granodiorita Granito <u>Sedimentarias:</u> - Flysch - Caustobolíticas	Pórfidos Cu, epitermales Au-Ag Skarn (W), hidrotermales (Au, Cu, Mo, Pb, Zn) Pegmatitas, albitita-greisen, hidrotermales (Sn, W, Ta, Li, Be) Materiales de construcción sedimentarios Pizarras combustibles
III Subsecuente	Post-orogénico/subsecuente (siálco contaminado)	<u>Magmáticas:</u> - Efusivas: Andesita, dacita, liparita - Intrusivas: “pequeñas intrusiones” dos) de composiciones variadas <u>Sedimentarias:</u> - Molasa - Moteadas/abigarradas	Subvolcánicas hidrotermales y epitermales (Sn, Ag, Au, Pb, Zn) Skarns y yacimientos plutónicos hidrotermales, con paragénesis de sulfuros (Cu, Pb-Zn, Ag-Au..) Materiales de construcción sedimentarios Sedimentarios/infiltrativos de Fe, Cu, V, U
IV Final	Final (simático contaminado y juvenil). Volc. Fisural (Tectónica germánica)	<u>Magmáticas:</u> - Efusivas: basaltos alcalinos, andesitas, etc. - Intrusivas: gabro-sienita-granito alcaliníferos <u>Sedimentarias:</u> De transición a plataforma; relacionadas con meteorización; lacustres, litorales, etc	Residuales, detríticas, infiltrativas (v. yacimientos “intraplaca”: Il, Tabla 8)

Tabla 6. Formaciones de rocas y yacimientos minerales tipomórficos en relación con el desarrollo geosinclinal (modificado de Smirnov, 1976; Baumann y Tischendorf, 1976)

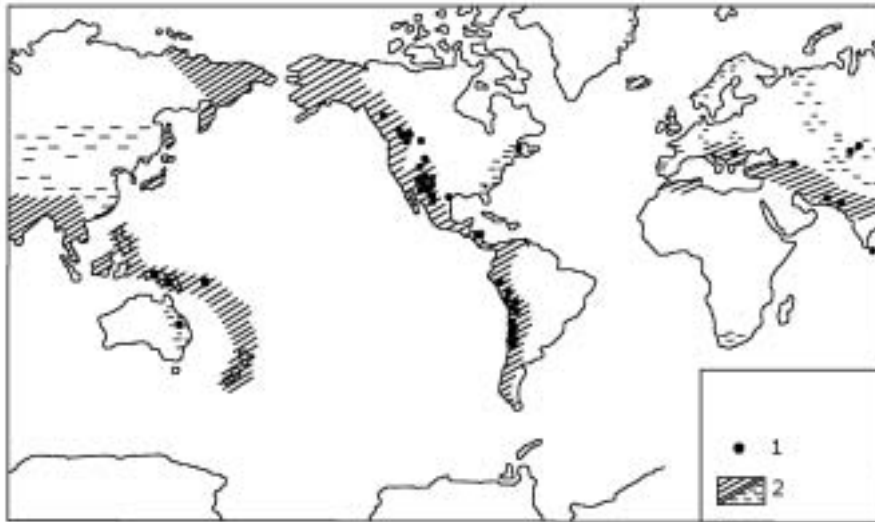


Fig.17.- Ubicación de los principales yacimientos del mundo de pórfidos cupríferos y relación con los orógenos fanerozoicos (modificado de Dixon, 1979). 1 Yacimiento. 2 Cinturones orogénicos: mesocenozoicos (rayado oblicuo)/paleozoicos (rayado horizontal, a trazos).

Las cuestiones fundamentales a dilucidar serán por qué ciertos yacimientos aparecen en determinadas zonas corticales y en determinadas épocas, mientras otras no son productivas.

La investigación geológico-metalogenética ha de permitir el conocimiento de las leyes –más propiamente, regularidades- que rigen estas distribuciones. Y éste es uno de los objetivos de más actualidad para la Metalogenia hoy en día, objetivo ya implícito en la definición tradicional (propuesta por de Launay) y explícito en las más recientes. En todo caso, es meta irrenunciable por:

- razones geológicas: los nuevos enfoques debidos a la Tectónica Global han demostrado que la comprensión profunda de los procesos particulares y regionales exige relacionarlos con otros más generales, que afectan a todo el globo terrestre y que quedan reflejados en diversos aspectos de su historia geológica; y
- razones económicas: el progresivo agotamiento de las reservas conocidas de materias primas minerales obliga a buscar criterios que ayuden a encontrar yacimientos en nuevas regiones: el conocimiento de las regularidades que condicionan la aparición de yacimientos –el conocimiento metalogenético, incluido su aspecto global- permite disminuir considerablemente el riesgo de la investigación.

Una observación –que temple el exceso de optimismo– es importante: del conocimiento global sólo se puede esperar la definición de áreas favorables, pero no la identificación inmediata de yacimientos, que depende de una investigación bien planteada y rigurosamente realizada.

Este esfuerzo de síntesis metalogenética, aunque cuenta hoy con renovados apoyos, no es nuevo. Ya los metalogenistas de pasadas generaciones, incluido Schneiderhöhn (1962), se preocuparon de generalizar los conocimientos metalogenéticos en las dimensiones espacial y temporal. Los puntos de vista innovadores e integradores de la Tectónica de Placas permiten una mejor comprensión de la distribución global de yacimientos. Afortunadamente, al campo de la Metalogenia no se ha transmitido la enconada pugna que ha marcado, en Tectónica, la difusión de los nuevos conceptos. Por ello, las meritorias síntesis –por ejemplo soviéticas y europeo-orientales– tradicionales, cuya validez es matizada por el nuevo enfoque, siguen siendo útiles, al haber un relativamente amplio acuerdo acerca de los hechos y relaciones fundamentales (compárense las tablas 6 y 8). Como se verá, los puntos de vista globales de la Tectónica de Placas permiten interpretar con mayor profundidad y completar las relaciones antes observadas.

Así las nociones de provincias y de épocas metalogenéticas ¹⁵ (Tablas 6 y 7) siguen conservando hoy toda su vigencia, aunque las interpretaciones tradicionales dejaran puntos oscuros, cuya explicación sólo es posible a la luz de los nuevos conocimientos. Los actuales esfuerzos de investigación y de síntesis tienen ya en cuenta los factores geotectónicos, entre los condicionantes esenciales de la formación de yacimientos.

¹⁵ Época metalogenética es una época de la historia geológica caracterizada por la presencia de un asociación típica de yacimientos o favorable para la formación de los mismos. Provincia metalogenética es una zona de la corteza terrestre en la que se ha formado una serie característica de yacimientos. La identificación precisa de provincias y épocas metalogenéticas es una eficaz herramienta en la exploración minera moderna.

ÉPOCA METALOGÉNÉTICA	EDAD (Ma)	ESTADIO / CARACTERÍSTICAS	FORMACIONES (ejemplos)	YACIMIENTOS IMPORTANTES (ej.) MAGMATISMO	UBICACIÓN (ESCUDO)	METALIZACIONES TÍPICAS
NEOPROTEROZOICO (Rifeico Superior)	540	Plegto Asintótico Plataforma	Form. Magmáticas (greisen) " Carbonatadas. Cu, Pb, Zn; Margas, Areniscas y Esquistos Cu	Labrador (Canadá): Sn, W, Be Gabón-Angola Mufulira y Copperbelt (Zambia, R.D. Congo: Shaba/Katanga)	N. Americano Africano	Sn, W, Be Cu, Pb, Zn
		Geosinclinal	Form. Pegmatita-Itabirita Skarn con magnetita Cuarzitas ferríferas	Satpura (India) Fe, Mn Baikalides (Rusia): Fe Québec (Canadá): Fe	Africano Indio Siberiano N. Americano	Cu, Co, U Fe-Mn Fe Fe
MESOPROTERO ZOICO (Rifeico Inferior)	1000	Orog. Greenville Magmatismo alcalino (de plataforma)	Form. Alcalinas " carbonatíticas " anortositicas con Fe-Ti	Kola (URSS): apatito, nefelino " : tierras raras Escandinavia: Fe, Ti	E. Europeo	Fe, Ti, Tr
		Geosinclinal	Form. sulfuradas.polimetalicas Cuarzitas Fe (Mn)	Broken Hill y Mt. Isa (Australia): Pb, Zn Flin-Flon y Noranda (Canadá): Zn, Cu	Australiano N. Americano	Cu-Pb-Zn
PALEOPROTERO ZOICO Superior	1600	Magmatismo Máfico	Form. Magmáticas máficas	India, África, S. América Sudbury (Canadá) Ni, Cu Taberg (Suecia) Ti, Fe, V	Indio, etc, N. Americano E. Europeo	Fe-Mn Ni-Cu Ti, Fe (V)
		Orog. Hudson Estadios de plataforma y de transición típicos Magmatismo intenso Geosinclinal	Lopolitos ultramáficos Formaciones de sulfuros Jaspilitas – Fe	Bushveld (S. África) Cr, P/Ni, Cu Orijärvi (Finlandia): Cu, Pb, Zn Pecenga (URSS): Ni, Cu Venezuela	S. Africano E. Europeo S. Americano	Ni-Cu, Ti-Fe; Cr-Pt Cu, Pb, Zn, Ni, Fe
		Plataforma	Conglomerados, cuarzitas: Au, U	Blind River (Ontario): U Witwatersrand (S.África): Au, U	N. Americano S. Africano	Au, U
Inferior	1900	Metamorfismo	Formaciones metamórficas	Mesabi (USA): BIF Metamorfizada Otanmäki (Finlandia): Ti-Fe Outokumpu (Finlandia): Cu, Zn	N. Americano E. Europeo E. Europeo	Fe Ti-Fe Cu, Zn
		Geosinclinal	Formaciones estratiformes Cu, Zn Jaspilitas Taconitas Itabiritas Gonditas, jaspilitas	Krivoi Rog (URSS): Fe L. Superior (USA): Fe Minas Gerais (Brasil): Fe Singhbun (India): Mn, Fe	E. Europeo N. Americano S. Americano Indio	Fe, Mn
ARCAICO	2500	Plegto Laurentico -Primeros cratones -Metamorfismo: cinturonos de "rocas verdes" y charnockitas -Volcanismo -Primeras diferenciaciones silílicas tras la "era lunar"	- Pegmatitas con T.R -Formaciones de oro orogénicas -Form. Intrusivas con magnetita	Kola (URSS)-Tierras raras Abitibi Belt, Canadá Kiruna, Suecia: Fe	E. Europeo N. Americano E. Europeo	Pegmat. Con T.R, Au Au Fe

Tabla 7. Épocas mineralogénicas precámbricas, en relación con las principales etapas del desarrollo terrestre (modificado de Baumann & Tischendorf, 1976)

POSICIÓN	YACIMIENTOS/TIPOS	EJEMPLOS	OBSERVACIONES
CONSTRUCTIVOS	Concentraciones metálicas en lodos submarinos, tipo Mar Rojo Cu: Cu: Sulfuros masivos (piritas cupríferas) Cr: Formaciones lenticulares con cromita	Mar Rojo, Equivalentes antiguos (?) Chipre, Terranova (?) Posible transporte a zonas de margen continental o arco insular	
TRANSFORMANTES	Cr: Formaciones lenticulares con cromita Cu y Mn: Conc. relacionadas con el hidrotermalismo (fisural) submarino	Guatemala Bolofo (Baja California)	Tendencia a la distribución de yacimientos, distritos y provincias metalogénicas orientada paralelamente a los bordes de placa
DESTRUCTIVOS	Cr: Formaciones lenticulares con cromita Cu-Zn-Pb: Sulfuros masivos volcanogénicos Mn: Formaciones volcanogénicas asociadas a sedimentos marinos Fe, Cu: Skarns de magnetita- calcopirita Cu (Mo): Pórfidos cupríferos. Ag-Pb-Zn: Hidrotermales Au, Au-Ag: Hidrotermales W,Sn, Hg, Mo: Hidrotermales sub-volcánicos y epitermales	Alaska New Brunswick (Canadá), Kuroko (Japón), British Columbia, Cuba, California, Japón Puerto Rico, Santo Domingo, Cuba, México, California Puerto Rico, USA (SW), Panamá, Filipinas, etc. México, USA (W), Canadá Mother Lode (California); Juneau Belt (Alaska) N y S América Occidental	
I BORDES DE PLACA			
ZONAS OCEANICAS	Mn-Fe (Cu, Ni, Co): Nódulos en fondos oceánicos Mn-Fe: Sedimentos en cuencas reducidas, con aportes volcánicos (?) Evaporitas en cuencas pequeñas o de apertura reciente	Pacífico Maine, USA S. Atlántico, Golfo de California	
MARGEN CONT. DE TIPO ATLANTICO	Ti, Zr, Fe, etc.: Concentraciones detríticas ("arenas negras") P: Depósitos de fosforita en la plataforma continental	Antiguos márgenes de Gondwana Márgenes atlánticos	Yacimientos preferentemente equidimensionales, orientación poco neta en la distribución de distritos y provincias metalogénicas. Influencia posible de grandes accidentes o estructuras tectónicas (fracturas corticales, etc)
II INTRAPLACA			
ZONAS CONTINENTALES	Au (U): Conglomerados precámbricos Fe (Mn): Formaciones oolíticas de Fe Sales, K, yeso, evaporitas. Cu: F: tipo "Red-bed", pizarras cupríferas U-V: Formaciones continentales Fe-Ti-V: Yac. no bandeados, en relación con anortositas masivas Cr, Cu-Ni-P, Fe-Ti-V: intrusiones ultramáficas estratiforme Nb, V, Ti, Cu, Fe, P: Yacimientos asociados a carbonatitas Diamantes: Formaciones kimberlíticas Fe-P) y Fe-Cu: Yac. asociados a complejos alcalinos Pb-Zn-Ba+Fe(Cu,Ni,Co): Yacimientos del tipo "Mississippi Valley"	Witwatersrand (R. Sudáfrica) Clinton (USA), Lorena (Francia) Cuencas de Michigan Kupferschiefer, etc. Colorado, Plateau Canadá, USA Bushveld (R. África del Sur), Stillwater (USA) África SE. Missouri (USA) Vale Mississippi, etc. (USA)	

Tabla 8. Génesis de yacimientos, en relación con la posición en las placas litosféricas (modificado de Guild, 1972). La comparación, a grandes rasgos, con la Tabla 6 permite apreciar el progreso en la interpretación global debido a la Tectónica de Placas: así, por ejemplo, resultan más comprensibles la ubicación, la distribución global y la relación con los movimientos litosféricos de los yacimientos magnéticos de los estradios I, II y III (Tabla 6), considerando sus posiciones respectivas con respecto a los bordes de placas (grupo I; Tabla 8); refiéranse, asimismo, las formaciones de plataforma y de transición (IV, Tabla 6; no detalladas) a las de posición "intra-placa" (II, Tabla 8). Nótese que la relativa estabilidad cortical durante el periodo de consolidación (o final, IV, Tabla 6; también, en menor medida, en las fases incipientes del periodo geosinclinal, I Tabla 6) permite la formación de depósitos sedimentarios análogos a los formados en placas; por ello, en relación con dichos estradios del desarrollo geosinclinal (Tabla 6), pueden establecerse transiciones al grupo "intra-Placas" (II, Tabla 8)

Evolución temporal y épocas metalogenéticas

9. EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ÉPOCAS METALOGENÉTICAS

Volviendo a la primera de las cuestiones anteriormente formuladas (sobre las Formaciones Bandeadas de Hierro, BIF), para intentar resolverla es necesario tener en cuenta la evolución geológica terrestre desde el Precámbrico, en la que han de distinguirse los procesos cíclicos –repetitivos– de los irreversibles (no repetitivos, “unidireccionales” o “finalistas”).

Un ejemplo de los primeros es el magmatismo orogénico, cuya evolución parece seguir, a grandes rasgos, pautas similares durante el desarrollo de las sucesivas orogenias.

Por el contrario, el carácter de la atmósfera, de la hidrosfera, de la biosfera, de los procesos de formación de rocas sedimentarias, etc. ha sufrido cambios irreversibles (Fig.18) desde la consolidación del globo terráqueo. La neutralización del agua marina, el desarrollo de la vida vegetal y de la fotosíntesis, el enriquecimiento progresivo de la atmósfera en oxígeno, la preponderancia de la litogénesis húmeda, árida o glacial, en detrimento de la volcano-sedimentaria, etc. son aspectos de esta evolución progresiva. Otro aspecto más sombrío y actual es el continuo incremento del contenido en CO₂ y en gases de “efecto invernadero” de la atmósfera, desde comienzos del siglo XX al menos, esta vez no por causas naturales, sino por acción u omisión humana.

Los cambios concomitantes en las condiciones de superficie han tenido que repercutir en el tipo de formaciones sedimentarias coetáneas; así la atmósfera actual, fuertemente oxidante, y el carácter ligeramente alcalino del mar (aparte de otros cambios, por ejemplo litológicos) son hoy desfavorables para las grandes concentraciones de hierro por precipitación química análogas a las BIF citadas, típicas del Precámbrico, ya que el hierro oxidado al estado férrico es insoluble, a no ser en medio muy ácido; por ello los yacimientos de hierro fanerozoicos son de otros tipos. Es decir que en el desarrollo de algunas concentraciones metálicas se observa una polaridad: la forma de depósito predominante va variando según las épocas, determinada por las condiciones geológicas y físico-químicas imperantes (dirección de las flechas en la figura 18).

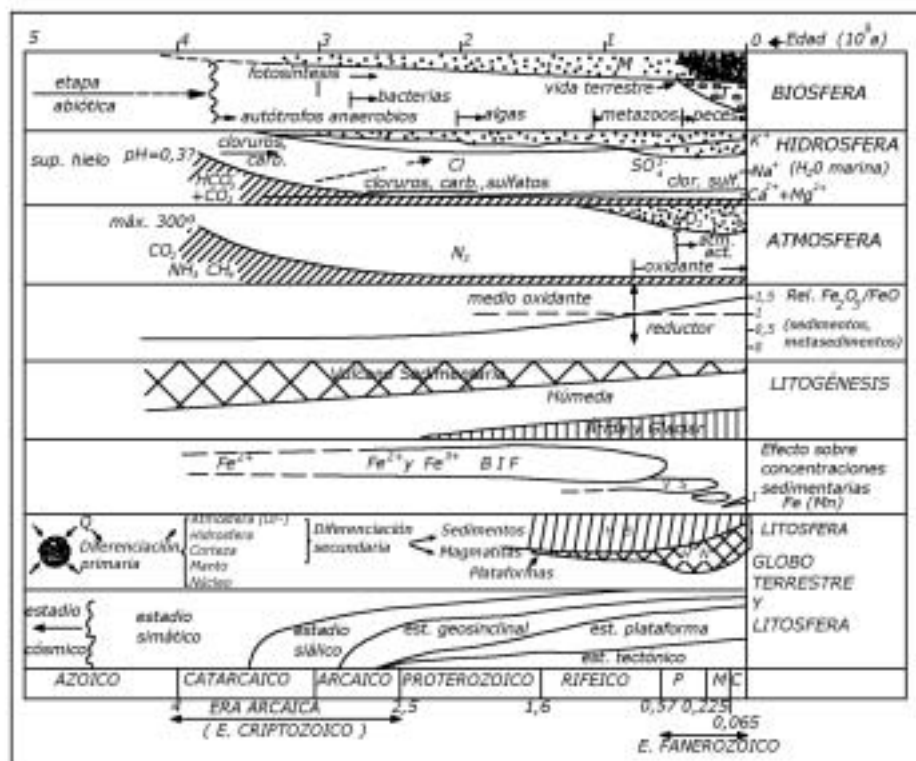


Fig. 18.- Evolución de algunas geoesferas a lo largo de la historia geológica del globo terrestre y formaciones ferríferas sedimentarias, condicionadas por la misma (modificado de Strakhov, en Smirnov, 1976, y de Rösler, en Baumann & Tischendorf, 1976). Edad indicada en Ga (1Ga=109 años), P: Paleozoico, M: Mesozoico, C: Cenozoico. BIF: Banded Iron Formations (Formaciones Bandeadas de Hierro). VS: Formaciones Volcano-Sedimentarias. Desarrollo litosférico (plataformas): HN, Hemisferio Norte; HS, Hem. Sur.

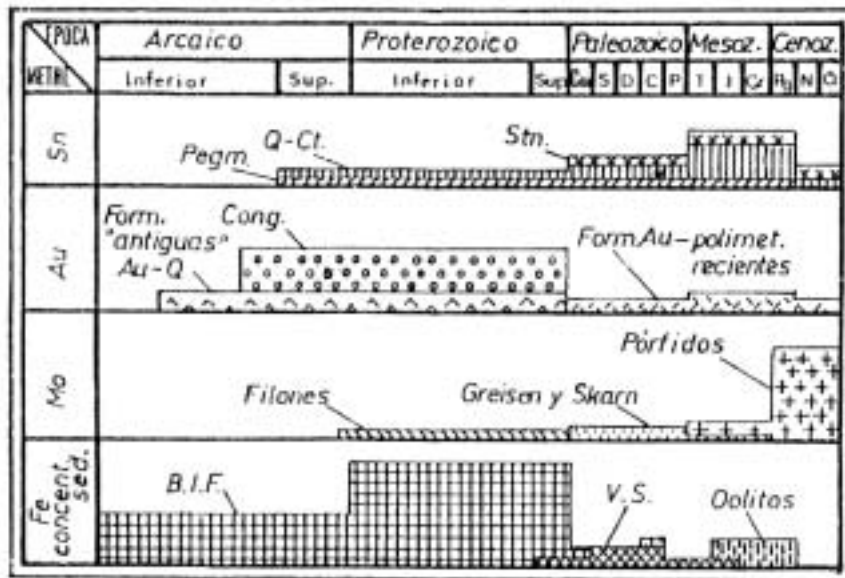
También las formaciones endógenicas evidencian netas desigualdades según las épocas (Figs. 19 y 20). Entre las orogenias fanerozoicas, señalaba ya Schneiderhöhn, por la productividad metalífera de su magmatismo, la Hercínica en Eurasia (Carbonífero – Pérmico) y la Larámica (Mesozoico-Cenozoico) en América; según dicho autor, los demás acontecimientos tectónicos tenían muy poca importancia desde el punto de vista metalogénico ¹⁶ y la mayor parte de los yacimientos con ellos relacionados se deberían:

¹⁶ Esta opinión (1962) debe ser revisada a la luz de los conocimientos actuales, particularmente por lo que se refiere al oro. Sirva de ejemplo la cuenca circum-pacífica, que ha adquirido hoy gran importancia, entre otras, por su producción minera de cobre y oro. Esta cuenca debe relacionarse, desde un punto de vista geotectónico con el importantísimo metalotecto que representa la cadena andina.

- a la regeneración orogénica de los anteriores (previamente hundidos a gran profundidad, de forma que su contenido metálico es removilizado y redistribuido en nuevas formaciones) o
- a la formación de yacimientos “secundario-hidrotermales” en la cobertera, gracias a la reactivación de las zonas ya cratonizadas, por una tectónica de tipo germánico, cuya fracturación favorece el ascenso de aguas termales y la consiguiente redistribución del contenido metálico de los yacimientos preexistentes en el zócalo hundido.

Estos casos son tratados por Schneiderhöhn juntamente con los yacimientos de la serie magmática normal (Grupo I de la clasificación, Tabla 4): el ejemplo más típico de regeneración lo constituyen, en su opinión, los yacimientos alpinos formados a expensas de núcleos hercínicos profundos. La observación de herencia metalogénica ¹⁷ en algunas provincias podría considerarse, en parte, como una confirmación de esta hipótesis. No obstante, la Tectónica de Placas tiene mucho que aportar al respecto.

Fig. 19.- Intensidad del desarrollo de diversos tipos de concentraciones metálicas a lo largo de la historia geológica. (Modificado de Baumann und Tischendorf, 1976; Q-Ct: cuarzo-casiterita; Stn: estannita; las “formaciones antiguas Au-Q” de estos autores, típicas de greenstone belts arcaicos, corresponden en términos actuales a los yacimientos de oro orogénicos; “Cong”: conglomerados, tipo Witwatersrand; V.S: volcano-sedimentarios).



¹⁷ Concepto ya definido (cf. “Definiciones”)

Desde un punto de vista general, los acontecimientos orogénicos citados se sitúan, respectivamente, en el marco de las épocas Paleozoica y Meso-Cenozoica, que son las dos fundamentales épocas metalogenéticas (minero-genéticas) fanerozoicas del globo; éstas han sido precedidas por otras cinco grandes épocas metalogenéticas precámbricas (Tabla 7), relacionadas con las principales etapas del desarrollo terrestre. En general, pueden distinguirse todavía, a pesar de la compleja superposición de acontecimientos tectónicos y magmáticos, erosivos, etc., los depósitos de plataforma y de geosinclinal. Entre éstos destacan los sedimentarios, los volcano-sedimentarios y los intramagmáticos (Fe-Mn, Cr-Pt, Ni-Cu, Fe-Ti, según se ha visto), que pueden sufrir intensas transformaciones posteriores, especialmente metamórficas, llegando a regenerarse a veces como formaciones metamorfogénicas. Entre los de plataforma se cuentan conglomerados de Au-U, areniscas y pizarras cupríferas y yacimientos de Pb-Zn en rocas carbonatadas, así como –en plataformas reactivadas tectónicamente– formaciones magmáticas (con Co- Ni-Cu, de carbonatitas, de apatito-nefelino, con tierras raras, de kimberlitas); en general están menos alterados por metamorfismo, gracias a su ubicación geotectónica (protección por la “armadura” cratónica).

Esta desigual distribución de la productividad metalogenética a lo largo de la historia geológica –correlativa con la desigual distribución en la corteza terrestre, o enriquecimiento en provincias metalogenéticas– no está todavía completamente explicada, aunque sí hay tendencias generales –tal es el caso de los yacimientos de hierro, según se acaba de ver– comprensibles con los datos de que se dispone hoy. Se ha mencionado ya la teoría de la herencia metalogenética; asimismo, a veces se interpretan las grandes anomalías metalogenéticas como relacionadas con zonas diferenciadas del manto terrestre.

¹⁸ Al final del apartado que sigue (Distribución Espacial y Provincias Metalogenéticas) se comenta también el caso de los yacimientos orogénicos de oro.

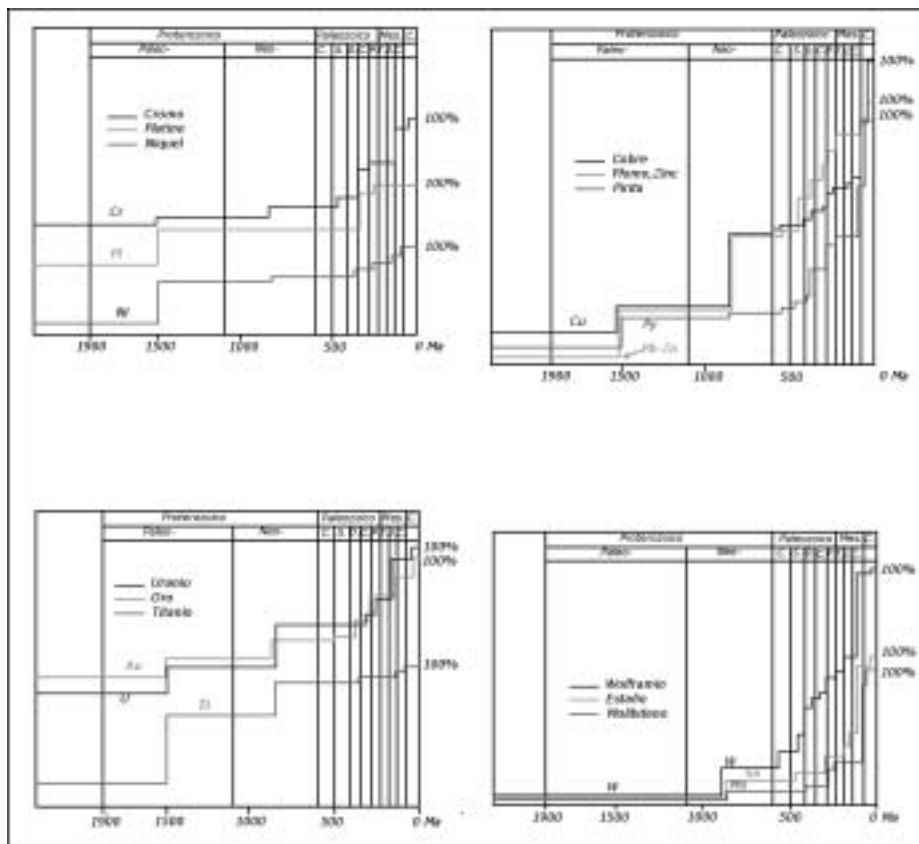


Fig. 20.- Intensidad del desarrollo de diversos tipos de concentraciones metálicas en la Historia Geológica. (Modificado de Petraschek, 1973a)

Distribución Espacial y Provincias Metalogenéticas

10. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y PROVINCIAS METALOGENÉTICAS

Se ha indicado ya que la formación de yacimientos está condicionada, entre otros factores, por el ámbito geotectónico y ha sido definido oportunamente el concepto de provincia metalogenética. La interpretación clásica, basada en la distinción entre cratones y zonas orogénicas y en la clasificación de los fenómenos magmáticos, tectónicos, sedimentarios, etc. con ellos relacionados (y con la fase de la evolución geosinclinal), sigue siendo un punto de partida útil (Tabla 6), por corresponder a hechos y a relaciones reales.

Dada la antigüedad de los escudos precámbricos (cratones), predominan en ellos los yacimientos más profundos, pues la erosión ha tenido más tiempo de descubrirlos; por el contrario, buena parte de los yacimientos exogénicos (residuales, detríticos...) habrán sido eliminados de aquéllos por la misma causa. Por otra parte, las características de su magmatismo y el metamorfismo que han sufrido, reiteradamente, durante las diversas orogenias experimentadas han dado lugar a yacimientos magmáticos y metamórficos de tipo y magnitud desconocidos en formaciones posteriores, como Broken Hill, Sudbury, Bushveld, ya citados (II.3, I.I.2 y I.I.1, respectivamente). Además, se atribuye a su estabilidad, rigidez y espesor cortical (por ejemplo en los cratones africanos) la gran profundidad obligada de los posteriores focos magmáticos relacionados con las diatremas kimberlíticas, profundidad decisiva para la aparición de diamantes. Asimismo, se encontrarán en ellos concentraciones sedimentarias condicionadas por el ambiente excepcional de la época: itabiritas, gonditas, placeres Au-U (en la atmósfera actual, la uraninita y la piritita que aparecen en estos placeres se oxidarían). Se explican así los tipos predominantes de yacimientos encontrados (Tabla 7).

Por lo que respecta a las zonas orogénicas, al quedar soldadas a los cratones (cratonización), se comportan como éstos en orogenias posteriores, en las que, como se ha explicado, sus eventuales yacimientos pueden ser regenerados ¹⁹.

¹⁹ Tras la cratonización se generan preferentemente yacimientos exogénicos, cuyos procesos de concentración se ven favorecidos por la estabilidad alcanzada. Los ejemplos son numerosos e importantes desde el Precámbrico hasta hoy: sulfuros de Pb-Zn en rocas carbonatadas (Pine Point, tipo "Mississippi Valley"), pizarras cupríferas ("Kupferschiefer", "Copperbelt", III.4.2.), hierros oolíticos (Clinton, Lorena; III.4.2.), yacimientos Cu-U-V en areniscas (Colorado Plateau; III.4.1.), placeres (III.3: Au-U, precámbricos, en Witwatersrand; Sn, recientes, en el SE asiático, etc.). Considerando las condiciones genéticas se constata que los ámbitos litorales o de aguas someras, los mares epicontinentales, etc., son especialmente productivos en este sentido.

En estas zonas se conservarán yacimientos más recientes y más superficiales, es decir, aquéllos cuya profundidad de formación sea intermedia o somera (cortejos filonianos de granitoides, formaciones subvolcánicas y epitermales...). Por otra parte, se encontrarán como neoformaciones –además de los ejemplos mencionados- los debidos a las condiciones oxidantes de la atmósfera actual, como los cementativos y residuales, o a la erosión (placeres, Figs. 4 y 8); éstos se hallarán preferentemente en terrenos recientes, debido a la vulnerabilidad ante los agentes erosivos.

La Tectónica de Placas permite elaborar modelos que explican la distribución global de algunos tipos de yacimientos. Como es sabido, según dicha teoría, el fondo oceánico se expande a partir de unas fracturas en las que se genera corteza (bordes constructivos), teniendo lugar –por necesidad, a superficie total del globo constante- una destrucción de la misma en otras zonas (bordes destructivos), por subducción o deslizamiento bajo un borde continental (Fig. 21) o bajo la corteza oceánica de otra placa, o bien un acortamiento por colisión continental (vbgr. Himalaya). ¿Qué significado metalogenético tienen estos procesos?

En un borde constructivo se pueden formar diversos tipos de yacimientos: las emanaciones hidrotermales ligadas al volcanismo fisural transportan metales -recuérdese el caso del Mar Rojo (III.4.3; fig. 15)- que podrán dar lugar, por ejemplo, a depósitos de sulfuros del tipo volcano-sedimentario (sulfuros masivos volcanogénicos, SMV, III.5.). Por otra parte, estas mismas disoluciones circulan a través de fracturas en la corteza oceánica, dando lugar a rellenos mineralizados y a impregnaciones de carácter hidrotermal (feeder o raíz de SMV). Finalmente, las rocas máficas del sustrato oceánico y las peridotitas del manto superior, subyacentes, pueden contener concentraciones orto-magmáticas o líquido-magmáticas del tipo I.1. (Cromita, sulfuros de Cu-Ni, EGP, Au...).

Al llegar a un borde destructivo, merced al movimiento de expansión de la corteza oceánica, todos estos materiales sufren subducción, al encontrarse ante la resistencia de una masa continental, o quedan retenidos entre los depósitos marginales, comprimidos entre ambas placas. ¿Qué sucede con las eventuales concentraciones metálicas? Una parte puede ser “embutida” entre los sedimentos deformados, a modo de jirones o escamas –obducción-, dando lugar a yacimientos orogénicos de los tres tipos mencionados, más o menos lenticulares, tal como se observa en determinadas zonas del orógeno alpino (ej. Albania, Chipre). Otra parte, al sufrir subducción, puede ser removilizada con los productos de fusión ascendentes o en disolución hidrotermal, contribuyendo a su vez a variados depósitos, vbgr. los tradicionalmente conocidos como del estadio intermedio u orogénico (plutonismo sinorogénico de Schneiderhöhn) y del estadio subsecuente (ibid) : diversos tipos de los grupos I.2 y I.3 (Sn, W, Cu, Au etc.). Hoy han adquirido gran importancia las concentraciones que se han tipificado como orogénicas de oro, sobre todo en cinturones acrecionados.

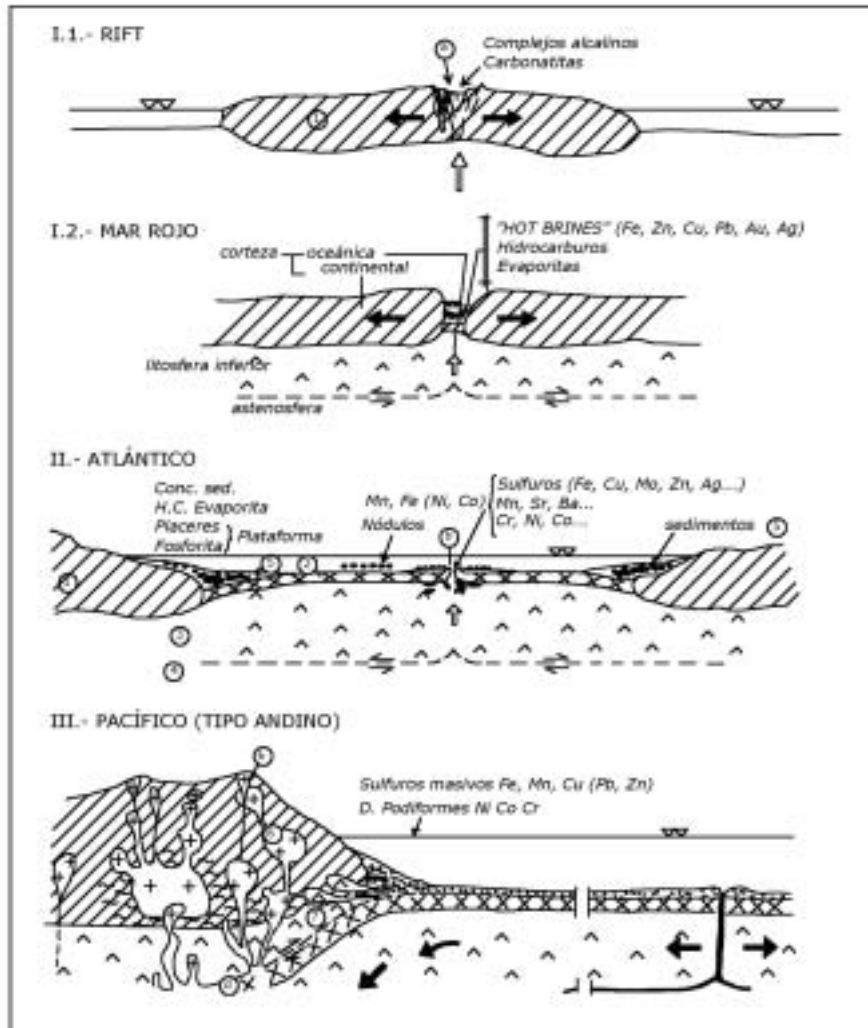


Fig.21.- Esquema elemental de la evolución litosférica terrestre según las concepciones de la Tectónica de Placas.

- I) Estado incipiente, con representación de dos fases sucesivas de desarrollo: I.1. Rift continental y I.2. Mar Rojo, en correspondencia con la evolución observada en la Región de los Grandes Lagos (África Oriental) y en el Mar rojo respectivamente. La fracturación continental será seguida por la separación de ambos bloques. a-Rift. 1-Continente. (Las flechas indican el sentido del movimiento). El Mar Rojo representa una fase más avanzada, en la que se inicia la formación de corteza oceánica.
- II) Estado evolucionado (ej. Atlántico): la separación continua de los continentes da lugar a renovados aportes magmáticos en la dorsal (b, borde constructivo), generándose continuamente corteza oceánica (2). 3 Litosfera inferior. 4 Astenosfera. 5 Sedimentos.
- III) Estado de resorción (ej. Pacífico): subducción de la corteza oceánica (d: Zona de Benioff), al impedir la superficie constante del planeta una expansión ilimitada del fondo oceánico. Fusión y magmatismo (6, efusivo e intrusivo) relacionado. Tal como sucede en el caso del Pacífico, puede haber dos bordes destructivos: un borde con arco insular y un margen de tipo cordillera, lo que corresponde a los casos de Asia y Sudamérica (Andes), respectivamente; este último es el representado. 7: Plegamiento, metamorfismo. (No se representan estadios posteriores; detalles: v. Fig.22).

La corteza oceánica y sus depósitos sedimentarios, fríos, al descender a zonas más profundas, llegan a fundirse, originando un volcanismo característico; en zonas más profundas todavía, este magma se contamina con la corteza siálica (ácida) suprayacente, dando lugar a magmas de tipo calcoalcalino, que asimismo pueden originarse por fusión diferencial y que por estar más profundos originan rocas plutónicas, aunque naturalmente también pueden ascender a niveles superiores y originar volcanismo (Fig.22). Asimismo, a suficiente profundidad y por efecto del gradiente geotérmico, puede fundirse -anatexia- una parte de la corteza continental, dando lugar también a rocas intermedias o ácidas. Finalmente, en zonas más alejadas se produce un magmatismo alcalino (potásico), de menor entidad.

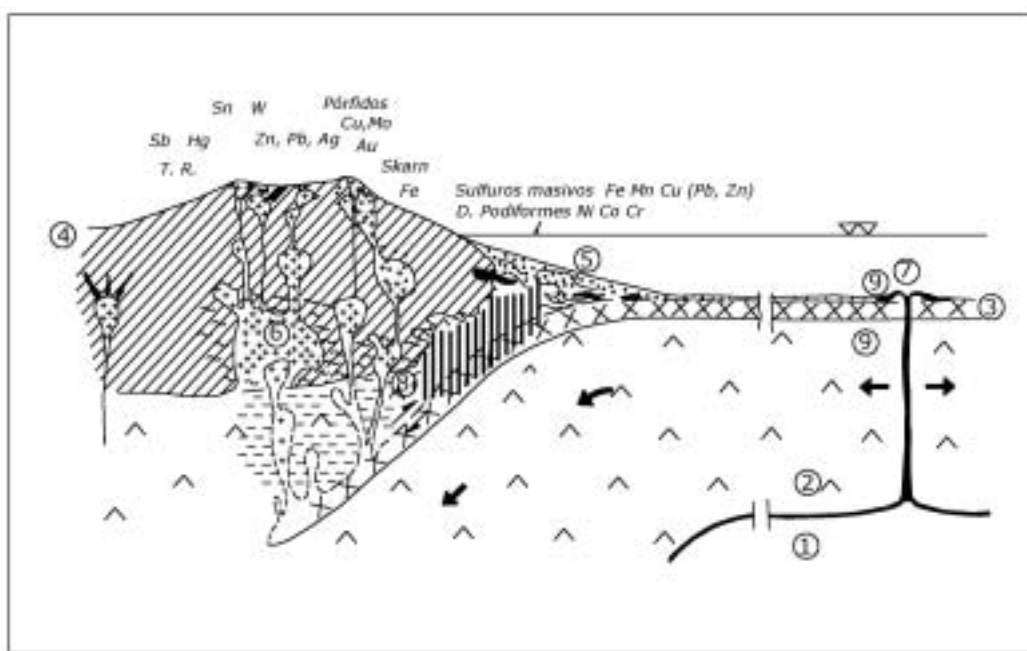


Fig 22.- Procesos magmáticos y mineralizaciones hipotéticas en un borde destructivo (detalle de la Fig. 21 III). 1 Astenosfera. 2 Litosfera inferior. 3 Corteza oceánica. 4 Corteza continental. 5 Sedimentos. 6 Magmatismo: calco-alcalino/alcalino. 7 Magmatismo máfico. 8 Metamorfismo de alta P (rayado vertical) de baja P y anatexia (señalado ~). 9 Yacimientos procedentes de borde constructivo (Fe-Mn, Cr-Ni, sulfuros, v. texto y Fig. 15): en su posición original con respecto a la corteza oceánica y transportados por ésta / obducidos. (Esquema idealizado).

Con estos datos y teniendo en cuenta los procesos genéticos, ya tratados, es fácil imaginar qué yacimientos pueden formarse en un borde destructivo de la placa (Fig. 22): yacimientos exhalativos submarinos (III.5.) relacionados con efusiones volcánicas, o tipo SMV; yacimientos hidrotermales (vbgr. pórfidos cupríferos o depósitos de Pb-Zn-Ag) y diversas formaciones estanníferas en relación

con el –especialmente relevante– magmatismo calcoalcalino; yacimientos variados (p.ej. de tierras raras) ligados a rocas alcalinas. Se han de tener en cuenta, además, los posibles efectos metalogenéticos del metamorfismo, ya comentados. Evidentemente, estos procesos no se producen todos en el mismo lugar ni simultáneamente, registrándose normalmente una sucesión espacial y temporal.

La Cordillera Andina, con su zonalidad característica (Fig.23), proporciona un soberbio ejemplo, en el marco de la provincia metalogenética (s.l.) circumpacífica, explicada por la subducción de la corteza de dicho océano, en bordes destructivos, bajo las masas continentales o de arcos – isla (fig.24).

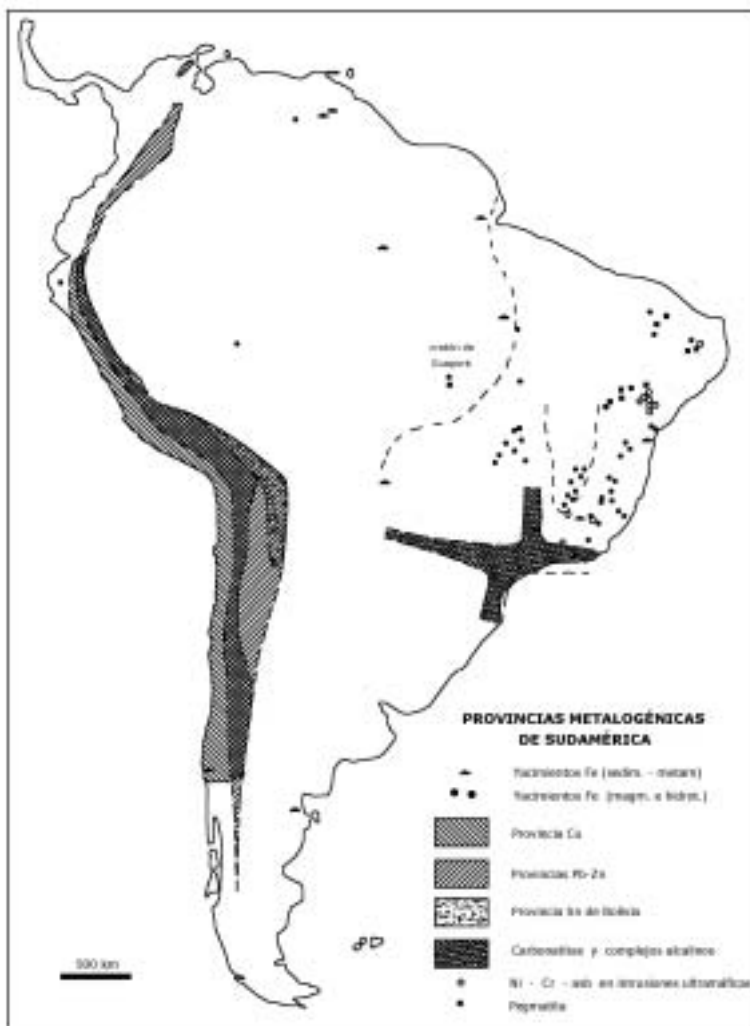


Fig. 23.- Provincias metalogenéticas andinas (modificado de Petersen, 1972).

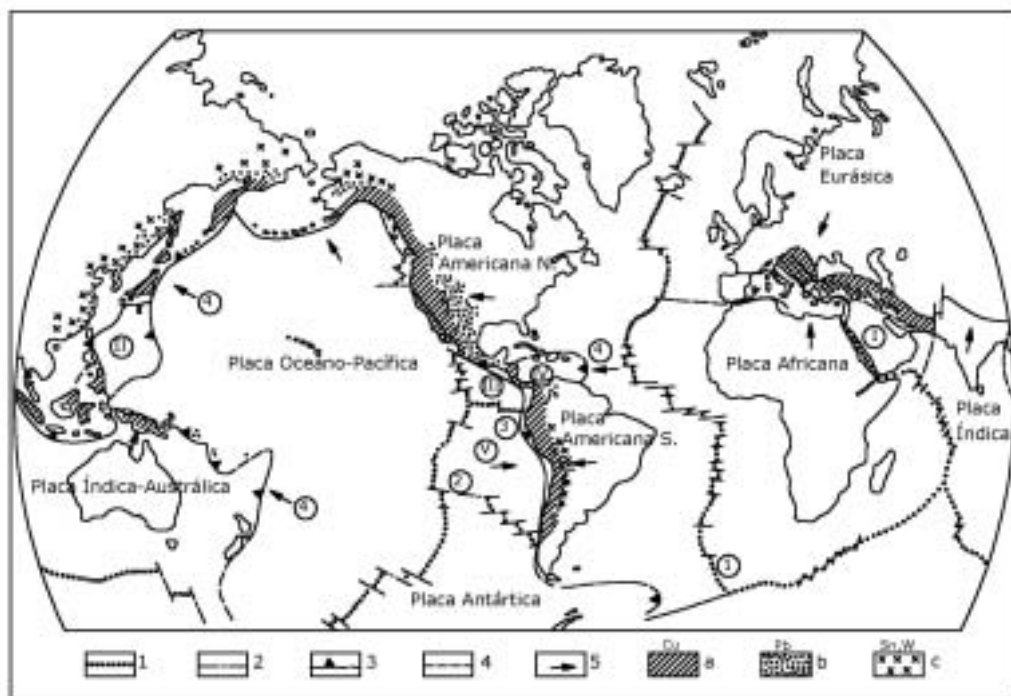


Fig. 24.- Zonalidad metalogenética circumpacífica (provincias cenozoicas) en relación con la Tectónica de Placas (modificado de Baumann y Tischendorf, 1976). 1 Borde constructivo. 2 Falla transformante. 3 Zona de subducción (con indicación del buzamiento). 4 Borde supuesto. 5 Movimiento relativo de placas. Los nombres de las placas están en la figura o indicados por los números: I – Arábica; II – Filipina; III – Cocos; IV – Caribe; V – Nazca. Zonas a, b, c: Zonas metalogenéticas, con indicación de los metales dominantes: Cu, Pb, Sn-W, respectivamente.

Finalmente, en cuanto a los depósitos formados en placas (“intra-placa” o en zona de placa), cabe esperar que las condiciones de mayor estabilidad favorecerán los procesos de diferenciación sedimentaria, lo que, unido a la menor intensidad del magmatismo –salvo casos de reactivación– resultará en un desarrollo preferente de las concentraciones exogénicas, como las biogénicas, las evaporíticas, las de precipitación química (vbgr. hierros oolíticos, formaciones estratiformes de sulfuros), las residuales y las detríticas o placeres.

Como se ve -Tabla 8- y a pesar de que queda mucho por hacer, la creciente comprensión de estos procesos generales ayuda a dar respuesta a las preguntas iniciales acerca de la perspectiva global, tanto en su dimensión espacial como temporal.

Una cuestión difícil, pero de indudable trascendencia económica, es la de la correspondencia entre las provincias ubicadas en continentes hoy separados, pero que en épocas anteriores formaban una unidad. El establecerla correctamente proporcionaría, sin duda, un buen criterio de prospección estratégica (Fig.25).

La síntesis espacio-temporal, al correlacionar provincias y épocas metalogenéticas a lo largo de la Historia Geológica, es una tarea ardua y exigente, pero su interés rebasa los límites de la especulación teórica. Puede tener también consecuencias prácticas importantes: por ejemplo, en el caso de las concentraciones orogénicas de oro, para las que Goldfarb y cols. (2001) han datado importantes procesos de concentración precámbricos y fanerozoicos, siendo los primeros episódicos (>3 Ga, 2.8 a 2.55 Ga y 2.1 a 1.8 Ga) y los segundos, más continuos (del Paleozoico al Terciario). Son relativamente escasas las concentraciones meso- y neoproterozoicas (1.6 Ga a 570 Ma), mientras que en terrenos recientes (<50 Ma) no se han identificado este tipo de concentraciones. La explicación radica para estos autores en la evolución diferencial del desarrollo litosférico en el tiempo y en el espacio, combinada con la acción de la erosión, que habría desmantelado las formaciones auríferas meso- y neoproterozoicas, pero no habría tenido tiempo de eliminar las paleozoicas o más recientes. En el caso de las arcaicas, al estar ubicadas en cratones estables, habrían quedado preservadas a pesar de su gran antigüedad. Por el contrario, las más jóvenes (<50 Ma), aunque se hayan formado, todavía no han sido descubiertas por la erosión y permanecerán como concentraciones ocultas hasta que su cobertera haya sido erosionada.

Por otra parte, relacionando desde un punto de vista espacial y temporal la génesis y distribución de estas concentraciones con el ciclo de un supercontinente, Kerrich y Cassidy (1994) concluyen que las mayores concentraciones se encuentran en orógenos externos, ligados al crecimiento por acreción tectónica del supercontinente, mientras que los orógenos internos o colisionales son menos favorables, lo que para estos autores se explica por el régimen tectono-estructural imperante en cada caso.

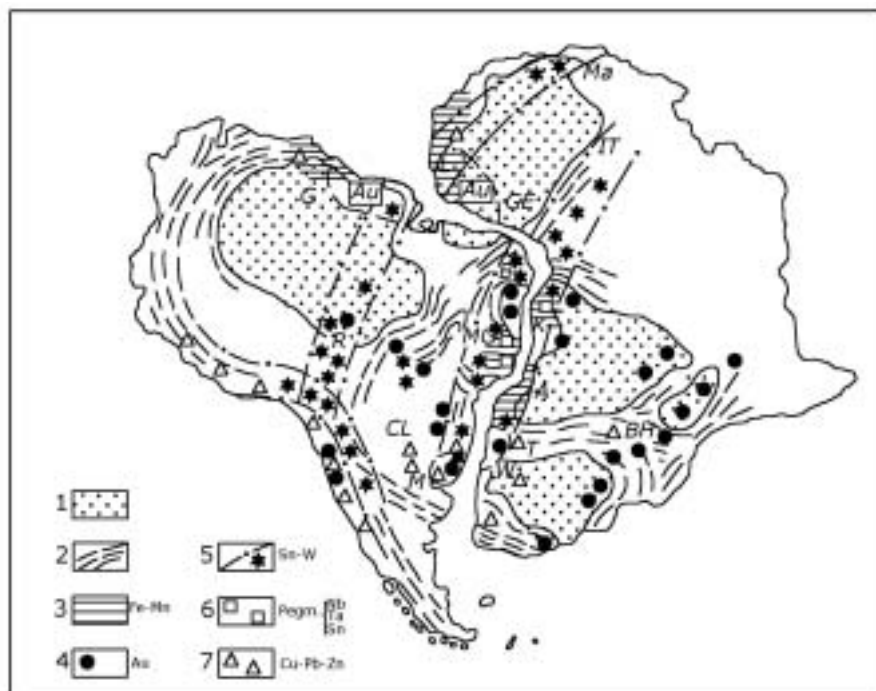


Fig. 25.- Correspondencia entre provincias minerogénicas de S. América y de África (modificado de Baumann u. Tischendorf, 1976). 1 Áreas cratónicas antiguas. 2 Áreas orogénicas. 3 a 7 Provincias metalógenéticas: Fe-Mn (3); Au (4); Sn-W (5); pegmatitas con Nb-Ta-Sn (6); Cu-Pb-Zn (7). A= Angola; B=Meseta de Borborema; BH = Broken Hill; CL= Córdoba, San Luis (Argentina); G= Guayana; GE= Costa de Marfil-Costa de Oro; IT= In Tounina; K= Congo (Brazzaville); L= Liberia; M= Montevideo; MG= Minas Gerais; R= Rondonia; T= Tsumeb; W=Walfischbay.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA RECOMENDADA

- ALEXANDERSSON G., KLEVEBRING, B.I. (1978). World Resources: Energy, Metals, and Minerals. Walter de Gruyter, Berlín, 248 p.
- AMSTUTZ, G., BERNARD A.J. eds. (1973). Ores in sediments. Intern. Union of Geol. Sc., A, 3, Springer, Berlin, 350 p.
- ANHAEUSSER, C.R. & MASKE, S., eds. (1986). Mineral Deposits of Southern Africa, Vols I & II. Geol. Soc. S. Africa, Johannesburg, 2335 p.
- BARNES H.L. ed. (1997) Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. 3rd. Ed.. John Wiley & Sons, New York, 897 p.
- BAUMANN, L., TISCHENDORF, G. (1976). Einführung in die Metallogenie/Minerogenie. VEB, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 460 p.
- BLANCHARD R. (1984). Interpretation of leached outcrops. Nevada Bureau of Mines, Bull. 66 (3rd. Printing), 196 p.
- BOWIE S.H.U., KVALHEIM A., HASLAM H.W., eds. (1978). Mineral deposits of Europe. Vol.1: Northwest Europe. The Institution of Mining and Metallurgy; The Mineralogical Society. London. 362 p.
- BLUNDELL D.J., NEUBAUER F., VON QUADT A. (2002). The Timing and Location of Major Ore Deposits in an Evolving Origin. The Geological Society, London. 358 p.
- CABRI L.J., ed. (2002). The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum- Group Elements. CIM Special Vol.54. Ottawa, Canada, 852 p.
- CISSARZ, A. (1965). Einführung in die allgemeine und systematische Lagerstättenlehre. 2te. völlig umgearbeitete Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 228 p.
- CRAIG J.R., VAUGHAN D.J. (1994). Ore microscopy and ore petrography, 2nd ed.. John Wiley and Sons. London. 434 p.
- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. (1997). Rock-forming minerals. Vol. 5B. Non-silicates (sulphates, carbonates, phosphates and halides). The Geological Society. London. 383 p.
- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. (1997). Rock-forming minerals. Vol. 1A. Orthosilicates. The Geological Society. London. 919 p.

- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. (1997). Rock-forming minerals. Vol. 1B. Disilicates and Ring Silicates. The Geological Society. London. 629 p.
- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. (1997). Rock-forming minerals. Vol. 2A. Single-chain silicates. The Geological Society. London. 668 p.
- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. (1997). Rock-forming minerals. Vol. 2B. Double-chain silicates. The Geological Society. London. 764 p.
- DIXON, C.J. (1979). Atlas of Economic Mineral Deposits, Chapman & Hall, London, 143 p
- DUNNING F.W., EVANS A.M. (1986). Mineral deposits of Europe. Vol.3: Central Europe. The Institution of Mining and Metallurgy; The Mineralogical Society. London. 355 p.
- DUNNING F.W., GARRARD P., HASLAM H.W., IXER R.A. (1989). Mineral deposits of Europe. Vol.4: Southwest and Eastern Europe, with Iceland. The Institution of Mining and Metallurgy; The Mineralogical Society. London. 454 p.
- DUNNING F.W., MYKURA W., SLATER D. (editors) (1982). Mineral deposits of Europe. Vol.2: Southeast Europe. The Institution of Mining and Metallurgy; The Mineralogical Society. London. 304 p.
- EDWARDS R., ATKINSON K. (1986). Ore Deposit Geology. Chapman & Hall, London, 466 p.
- EVANS A. M. (1993). Ore geology and Industrial minerals (3rd ed.). Blackwell Science. Oxford. 389 p.
- EVANS A.M. (1997). An introduction to Economic Geology and its environmental impact. Blackwell Science. London. 364 p.
- EVANS A.M. (1995). Introduction to mineral exploration. Blackwell Science. London. 396 p.
- FAURE G. (1998). Principles and Applications of Geochemistry. Prentice Hall. New Jersey. 600 p.
- FAURE G. (1986). Principles of isotope geology. John Wiley and Sons. New York. 589 p.
- FONTBOTÉ L., AMSTUTZ G.C., CARDOZO M., CEDILLO E., FRUTOS J., eds. (1990). Stratabound Ore Deposits in the Andes. Spe. Pub. N°8 (SGAMD), Springer- Verlag, Berlin, 815 p.
- FOSTER R.P., ed. (1996). Gold metallogeny and exploration. Chapman and Hall. London. 431 p.
- GARCÍA GUINEA J., MARTÍNEZ FRÍAS J., eds (1992). Recursos Minerales en España, CSIC, Madrid, 1448 p.
- GARRELS R. M. & CHRIST C. L.(1965) Solutions, minerals, and equilibria. Harper & Row, New York. 450 p.

- GOLDBERG I., BOTHA J.C., HARDING A.J., ARMITAGE W.K., PEROLD J.W., eds. (2000). South Africa's Mineral Industry 1998/99. Dept. Minerals and Energy; Mineral Economics Directorate (Minerals Bureau). Pretoria. 266 p.
- GUILBERT J. M., PARK C. F., JR. (1997). The geology of ore deposits, 6th ed. W.H. Freeman and Company. New York. 985 p.
- HEDENQUIST J.W., THOMPSON J.F., GOLDFARB R.J., AND RICHARDS J.P. eds. (2005). Economic Geology 100 Aniversary Volume. Society of Economic Geologists. Littleton, Colorado. 1146 p.
- HERRINGTON R., STANLEY C., SYMES R. (1999). Gold. Natural History Museum. London. 64 p.
- KAY S.M., RAMOS V.A. (2006) Evolution of an Andean Margin: A Tectonic and Magmatic View from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39° S lat). GSA Spec. Paper, 407, 359 p.
- KIRKHAM, R.V., SINCLAIR, W.D., THORPE, R.I., DUKE, J.M., eds. (1993) Mineral Deposit Modeling. Geological Association of Canada. Special Paper 40. St. John's, 798 p.
- KLEMM, D.D., SCHNEIDER H. J. (1977). Time- and strata-bound ore deposits. Springer-Verlag, Berlin. 444p.
- KORZHINSKII, D.S. (1970). Theory of Metasomatic Zoning. Clarendon Press, Oxford, 162 p.
- KRAUSKOPF K. B., BIRD D. K. (1995). Introduction to geochemistry (3rd ed.). McGraw-Hill, Inc.. New York. 647 p.
- LAZNICKA P. (2006). Giant Metallic Deposits-Future sources of Industrial Metals. Springer Verlag, Berlin, 732 p.
- LUNAR R., OYARZUN R. (1991). Yacimientos Minerales, Técnicas de estudio. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces. 938p.
- MAC, Mineralogical Association of Canada (1980-2007). Excelentes monografías sobre temas diversos y actuales de investigación de yacimientos minerales; por su número y por el carácter específico de su contenido no se citan de forma individualizada, pero pueden consultarse en la página web o en los catálogos de MAC; ha de destacarse la serie: MAC Short Course.
- MATHERS S.J., NOTHOLT A.J.G., eds. (1994). Industrial minerals in developing countries. British Geological Survey. Nottingham, UK. 272 p.
- McBIRNEY A.R. (1993). Igneous Petrology, 2nd ed.. Jones and Bartlett Publishers. U.S.A.. 508 p.
- MCKINSTRY H.E. (1977). Geología de minas. Ediciones Omega, S.A.. Barcelona. 671 p.

- NICCOLINI P. (1970). *Gîtologie des concentrations minerales stratiformes*. Gauthier-Villars Eds., Paris, 792 p.
- PARISH R. V. (1977) *The Metallic Elements*, Longmann, London, 254 p.
- PARK C.F., Mc DIARMID R.A (1981). *Ore deposits*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co. Inc., New York 522 p.
- PEREIRA E.S., CASTROVIEJO R., ORTIZ F., eds (2004) *Complejos Ofiolíticos en Iberoamérica. Guías de Prospección para Metales Preciosos*. Proyecto XIII.1, CYTED, Madrid, 379 p.
- PETRASCHECK, W.E. (1973) *Metallogenetic and geochemical provinces*. New York, Springer- Verlag, 183 p.
- PETRASCHECK, W.E, POHL W. (1982) *Lagerstättenlehre* (3 Aufl.). E. Schweizerbart'sche Verglasbuchhandlung, Stuttgart, 341 p.
- PETERS W.C. (1987). *Exploration and mining geology* (2nd ed.). John Wiley and Sons. New York. 685 p.
- PIRAJNO F. (1992). *Hydrothermal mineral deposits*. Springer-Verlag. Berlin. 709 p.
- PRENTICE J. E. (1990). *Geology of construction materials*. Chapman and Hall. London, New York.. 202 p.
- RIDGE, J.D. ed. (1968). *Ore deposits of the United States, 1933 - 1967*. Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers. New York , 2 vols., 1880 p.
- ROBB L. (2005). *Introduction to "Ore-Forming Processes"*. Blackwell Publishing. 373 p.
- ROBERTS R.G., SHEAMAN P.A., eds (1998). *Ore deposit Models*. Geoscience Canada, Reprint, Series. Geol. Assoc. of Canada, 194 p.
- ROUTHIER, P. (1963). *Les Gisements Métallifères*. Masson et Cie, Paris, 2 vols., 1282 p.
- ROUTHIER, P. (1980). *Où sont les métaux pour l'avenir?: Les provinces métalliques: essai de métallogénie globale*. Mém. BRGM, Orléans, 105, 410 p.
- SAWKINS E.J. (1990). *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*, 2. ed. Springer-Verlag, Berlin, 461 p.
- SCHNEIDERHÖHN, H. (1962). *Erzlagerstätten (Kurzvorlesungen zur Einführung und Wiederholung)*. 4 Auflage. Fischer- Verlag, Stuttgart, 371 p.
- SEG, Society of Economic Geologists (1980-2007). Excelentes monografías sobre temas diversos y actuales de investigación de yacimientos minerales; por su número y por el carácter específico de su contenido no se citan de forma individualizada, pero pueden consultarse en la página web o en los catálogos de SEG; destacan las series:
- Reviews in Economic Geology (por ejemplo nº 2, 4, 8, 9, 13, 14),
 - Special Publication Geology (se recomiendan, por ejemplo nº 5 a 12)
 - Guidebook Series (por ejemplo, nº 30, 31).

SKINNER B.J. ed., (1981). Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume: 1905-1980 The Economic Geology Publishing. N. Haven, USA, 964 p.

SKINNER B.J. (1989). A Special Issue devoted to current Research on Mineral Deposits of Europe. Econ. Geol. Vol 84, 5 (spec. issue)

SKINNER B.J. ed. (1999). Geology and ore deposits of the Central Andes. SEG. Special publication nº 7. Littleton, Colo. USA, 351 p.

SMIRNOV, V.J. (1976). Geology of Mineral Deposits - Mir, Moscú, 520 p.

SPRY P.G. & BRYNDZIA L.T., eds. (1990) Regional Metamorphism of Ore Deposits and Genetic Implications. Proc. 28th Internat. Geol. Congr., VSP, Utrech, 250 p.

STANTON, R.L. (1972). Ore Petrology. McGraw-Hill Book Co. New York. 713 p.

STRONG D.F., ed. (1976) Metallogeny and plate tectonics. Geol. Assoc. of Canada Spec. Paper 14, Toronto, 660 p.

TAYLOR R.G. (1979) Geology of tin deposits. Developmts. In Econ. Geology, 11, Elsevier, Amsterdam, 543 p.

VAUGHAN D.J., ed. (2006) Sulfide Mineralogy and Geochemistry. MSA Rev. in Mineralogy and Geochemistry, vol. 61. Washington, 714 p.

VAZQUEZ GUZMÁN, F. (1996). Geología Económica de los Recursos Minerales. Fundación Gómez Pardo, Madrid. 484 p.

VOKES, F.M. (1969). A Review of the Metamorphism of Sulfide Deposits. Earth Science Review, Elsevier, Amsterdam, Vol.5, p 9-13.

WOLF, K.H., ed., (1976). Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Co., 7 vols., 2945 p.

OTRAS REFERENCIAS CITADAS

FERNADEZ POLO J.A. (1970) Caracteres Geológicos, estructurales y genéticos de los yacimientos uraníferos de Salamanca. Energía Nuclear, 64, año XIV, marzo - abril.

GOLDFARB R. J., GROVES D.I., GARDOLL S. (2001) Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. Ore Geology Reviews, 18, pp. 1-75.

GOLDSCHMIDT, V.M. (1958). Geochemistry. Oxford University Press, Fairlawn N.J., 730p.

GUILD, P.W. (1973). Distribution of metallogenic provinces in relation to major earth features. S.10-24 In: Petrascheck, W.E. (Editor), Metallogenetische und Geochemische Provinzen, Symp. Leoben, Springer-Verlag, Wien, 1835 p.

HUTTENLOCHER, H., RAMDOHR P. (1965) Mineral- und Erzlagertstättenkunde. Walter de Gruyter, Berlin, 2 Bd, 137 & 265 p.

KERRICH R., CASSIDY K.F. (1994) Temporal relationship of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation - Archean to present: a review. *Ore Geology Reviews*, 9, pp. 263-310-.

KRAUSKOPF, K.B. (1967) *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill Book Co. New York, 721 p.

MASON, B. (1966) *Principles of Geochemistry*. 3d. Ed.. J. Wiley & Sons, New York, 329 p.

PETERSEN, U. (1972) Geochemical and tectonic implications of South American metallogenic provinces. *Ann. of the N.York Acad. of Sci.*, 196, Art.1, p. 1-38

PETRASCHEK W. (1973 a) Die Herkunft der Erzmetalle. Pp.174 a 183, In: Petraschek W., ed. (1973) *Metallogenetische und Geochemische Provinzen*. Springer-Verlag, Wien, 1835 p.

RÖSLER H.J., LANGE H. (1972). *Geochemical Tables*. Elsevier. Amsterdam, 468 p.

ROUTHIER, P. (1969) *Essai critique sur les méthodes de la géologie (de l'objet à la Genèse)*. Masson, Paris, 204 p.

ROUTHIER, P. (1980). Où sont les métaux pour l'avenir?: Les provinces métalliques : essai de métallogénie globale. *Mém. BRGM, Orléans*, 105, 410 p.

SCHNEIDERHÖHN, H. (1962). *Erzlagerstätten Kurzvorlesungen zur Einführung und Wiederholung*. 4 Auflage. Fischer- Verlag, Stuttgart, 371 p.

SZADECZKY K.E., KARDOSS E. (1952) Ueber zwei neue Wertigkeitsregeln der Geochemie und die geochemische Gruppierung der Elemente. *Acta Geol. Acad. Sci. Hung.* 1, 231-268 p.

ZIMMERMANN, R.A. & AMSTUTZ G.C. (1964) Small scale sedimentary features in the Arkansas barite district. In: Amstutz, G.C., Ed. *Sedimentology and Ore Genesis: Developments in Sedimentology*,. Vol. 2, Elsevier, Amsterdam.

AGRADECIMIENTO

El autor agradece a Lázaro Sánchez Castillo, Departamento de Ingeniería Geológica, ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid, su valiosa ayuda para la elaboración de los materiales gráficos y a Geovanna Delgado la digitalización del texto. Expresa su gratitud, igualmente, a las personas y editoriales que han permitido la reproducción de figuras o datos reproducidos en el texto. Agradece asimismo a los alumnos y colaboradores sus sugerencias para la mejora del texto y la detección de erratas.



