

## Léxico de geología económica\*

Jorge Oyarzún M., Geol. Dr. Sc.  
Universidad de La Serena (Chile)



*Antigua mina a cielo abierto de Parys Mountain (Pb-Zn-Cu) en Gales. <http://www.cemaes-bay.co.uk/attractions/parysmountain.htm>*

### Nota del Autor

La Geología Económica implica una especial complejidad por la amalgama de conceptos científicos, tecnológicos y económicos que ella implica. De ahí los diversos enfoques con que ha sido abordada, que van desde los estrictamente científicos: *ore petrology* o en español: **petrología de menas**, que considera las menas como un caso especial de rocas, hasta los de **geología económica** propiamente tal, pasando por el enfoque intermedio de **depósitos minerales**. Este léxico está orientado hacia el enfoque intermedio, vale decir, el entendimiento de los depósitos minerales como tales. Esto es, en términos de su

naturaleza y origen, y de la aplicación de esa comprensión a su explotación, así como a la exploración de nuevas reservas y nuevos yacimientos. Por otra parte, está centrado en los **yacimientos metalíferos**. En este documento se presenta un léxico de términos fundamentales elaborado como material docente auxiliar para asignaturas de geología e ingeniería. Su redacción pretende ir más allá de las simples definiciones, incluyendo explicaciones básicas de cada término y su importancia y aplicaciones.

\* Edición para **Aula2punto.net**: R. Oyarzun & P. Cubas

## A

**ACTINOLITA:** Mineral del grupo de los anfíboles (= anfíbolos). Se forma en torno a los 450°C y es característico de algunos yacimientos hidrotermales, como los de Fe y de Fe-Cu-(Au) de la Cordillera de la Costa del norte de Chile y del sur del Perú. La actinolita puede dar lugar a fases asbestiformes que revisten especial peligrosidad para la salud humana.

**ACTIVIDAD:** Parámetro termodinámico que corresponde a la concentración “corregida” de una sustancia. Se utiliza para incluir en los cálculos el efecto de otras sustancias presentes en la solución, que pueden afectar las relaciones de equilibrio químico. La actividad ( $a$ ) se expresa en términos de la concentración ( $c$ ) multiplicada por el respectivo coeficiente.

**ACUÍFERO:** Cuerpo de aguas subterráneas, presentes en estructuras primarias (poros interconectados), secundarias (fracturas) o cavidades (karst) de las rocas o sedimentos. En el caso de acuíferos “libres”, el acuífero está comprendido entre el nivel freático y una zona impermeable en profundidad. Las explotaciones mineras a cielo abierto y subterráneas interactúan con los acuíferos, lo cual implica problemas que deben resolverse durante su operación y que pueden complicar gravemente su futuro cierre (generación y transporte de drenaje ácido, etc). Ver además nivel freático.

**ADULARIA:** Es un feldespato potásico ( $KAlSi_3O_8$ ) de igual composición que la ortoclasa (= ortosa). Sin embargo, la adularia se forma por efecto de soluciones hidrotermales y es común en las asociaciones mineralógicas del ambiente epitermal (yacimientos epitermales del tipo sericita-adularia).

**AGREGACIÓN DE VALOR:** Toda actividad económica (fabril, comercial, extractiva, etc.) tiene por objeto la creación de valor, vale decir, el producto de la actividad debe tener un mayor valor que lo existente inicialmente más los costos que la actividad implica. En minería moderna, este concepto se ha extendido a todas las fases de la operación, siendo tarea de los geólogos e ingenieros maximizar la agregación de valor que implica su actividad específica. La más obvia y directa es el descubrimiento de nuevos depósitos económicos, donde las empresas obtienen las más altas rentabilidades. Al descubrimiento de un cuerpo mineralizado explotable le siguen actividades como la expansión de reservas y recursos, la información litológica y estructural que permite optimizar las labores mineras, el apoyo a las operaciones de beneficio metalúrgico a través de información geometalúrgica (mineralógica, litológica y estructural), la evaluación hidrogeológica del distrito, en términos de nuevas fuentes de agua, de riesgos

geotécnicos asociados a cambios del nivel freático y de la posible dispersión de drenaje ácido por las aguas subterráneas. Igualmente, los geólogos pueden suministrar valiosa información para la preparación del futuro plan de cierre de las faenas mineras (= labores mineras), tarea que hoy se inicia desde la etapa de diseño de las operaciones.

**ALCALINOS:** Elementos químicos del Grupo 1A: Li, Na, K, Rb, Cs y Fr. Son elementos fuertemente reactivos, tanto con el oxígeno del aire como con el agua. Sus hidróxidos presentan una elevada disociación en agua y por lo tanto fuerte reacción básica o "alcalina". Na y K, y en menor concentración Rb, desempeñan un papel principal en los procesos de alteración hidrotermal.

**ALBITIZACIÓN:** Proceso de alteración hidrotermal que implica un reemplazo del contenido de calcio de la plagioclasa por sodio. Si ese reemplazo ocurre en presencia de Fe, la albita formada puede presentar un color rosado (que puede llevar a confundirla con ortoclasa = ortosa). También se ha encontrado (Distrito Punitaqui) una "albita negra", resultado de microinclusiones de magnetita. La albitización es un proceso importante de la alteración propilítica.

**ALBITÓFIRO:** Roca volcánica o subvolcánica que presenta un fuerte metasomatismo alcalino, que implica reemplazo del Ca original de la plagioclasa (albitización). En Chile, existen cuerpos de este tipo en varios distritos cupríferos, como el de Punta del Cobre, al sur de Copiapó.

**ALCALINO TÉRREOS:** Elementos químicos del Grupo 2A, al que pertenecen Be, Mg, Ca, Sr, Ba y Ra. Su reactividad es menor que la de los elementos del Grupo 1A, pero de todas maneras considerable. Al igual que los elementos del Grupo 1, forma cloruros solubles, y las inclusiones fluidas salinas de los minerales (p.ej. cuarzo, calcita, y otros) pueden contener cloruros de Na, Ca y Mg.

**ALINEAMIENTO:** En inglés: *lineament*. Se denomina así a una faja estrecha y alargada de yacimientos metalíferos. Los alineamientos están controlados por grandes zona de falla o líneas de contacto geológico. En Chile y en general en la Cadena Andina, los alineamientos facilitan mucho la exploración minera. Así, yacimientos como los pórfidos cupríferos, los depósitos ferríferos cretácicos y los yacimientos epitermales del norte de Chile, presentan notables alineamientos controlados por megazonas de falla como las de Atacama (Fe) y Domeyko (Cu-Mo).

**ALTERACIÓN ARGÍLICA** (en inglés: *argillic alteration*): Alteración hidrotermal, que destruye los feldespatos, dando lugar a la formación de caolinita y/o montmorillonita

(según la mayor o menor intensidad del metasomatismo de  $H^+$ ). En los pórfidos cupríferos se desarrolla en una etapa hidrotermal tardía y de menor temperatura, junto con el depósito de pirita. También se la denomina alteración argílica intermedia. Los minerales de arcilla se forman también por efecto de la acidez que genera la oxidación de los minerales sulfurados, en especial de la pirita.

**ALTERACIÓN ARGÍLICA AVANZADA** (en inglés: *advanced argillic alteration*): Es un tipo de alteración hidrotermal propio de niveles cercanos a la superficie o muy tardíos en la evolución de un pórfido cuprífero. Es propia de yacimientos epitermales de alta fugacidad de azufre y de oxígeno. Implica un elevado metasomatismo de  $H^+$ , que destruye completamente los feldespatos y la sericita, dando lugar a la formación de alunita (sulfato de Al y K), acompañada por caolinita y sílice. En Chile está presente en yacimientos epitermales cordilleranos, como Tambo, La Coipa y Pascua (Proyecto Pascua-Lama). En España aparece asociada a yacimientos epitermales como los de El Cinto (Rodalquilar). Esta alteración implica especiales riesgos de generación de drenaje ácido, dado que la roca pierde toda posibilidad de neutralizar la acidez ( $H^+$ ) a través de la hidrólisis de sus silicatos. Genera un importante blanqueo (*bleaching*) de las rocas, lo que facilita la exploración de los depósitos en los que está presente. La alteración argílica avanzada debilita mucho los macizos rocosos, lo cual puede dificultar su explotación, y en algunos casos dificulta las labores de sondeo (= sondajes).

**ALTERACIÓN CALCO-SÓDICA:** Es la alteración hidrotermal característica de los yacimientos ferríferos del tipo Kiruna o *Volcanic Hosted Magnetite*. Incluye una fuerte albitización de las rocas presentes en los niveles basales del sistema (muy bien expuesta en el distrito de Great Bear Lake, Canadá), así como clinopiroxeno, actinolita, clorita, escapolita y epidota. En los yacimientos del norte de Chile, el depósito de la magnetita fue acompañado por el de actinolita y apatito (= apatita), a unos  $500^{\circ}$ - $450^{\circ}$ C de temperatura.

**ALTERACIÓN FÍLICA** (en inglés: *phyllic alteration*): También se denomina alteración cuarzo-sericítica. Es un tipo de alteración hidrotermal moderada, caracterizada por razones Metal/ $H^+$  intermedias. En ella los feldespatos se convierten en una variedad fina de muscovita (= moscovita), mientras se libera  $SiO_2$  que cristaliza como cuarzo. En los pórfidos cupríferos se desarrolla en una etapa intermedia de su evolución, cuando las aguas meteóricas penetran en el sistema hidrotermal y remobilizan parte de su mineralización temprana. Es frecuente que sea acompañada por turmalina fina. En Chuquicamata, la zona fílica se sitúa próxima a la Falla Oeste y está acompañada de mineralización de Cu y Mo importante, pero rica en sulfosales de As-Sb. Es una

alteración muy común en yacimientos tipo chimenea de brecha. Su temperatura se sitúa en torno a los 500°C

**ALTERACIÓN HIDROTERMAL** (en inglés: *hydrothermal alteration*): Las soluciones hidrotermales (vale decir, de aguas calientes) tienen variados orígenes. Junto con su capacidad para transportar metales de interés económico, interactúan con las rocas, alterando su mineralogía y composición química. Su interés en geología económica se deriva de su asociación con determinados tipos de mineralización. Por ejemplo, la alteración potásica se relaciona con la principal mineralización hipógena (= hipogénica) de los pórfidos cupríferos. En general, los tipos de alteración hidrotermal se pueden agrupar en dos principales: 1) Alteraciones por metasomatismo de elementos alcalinos o alcalino-térreos: alteración potásica, alteración calco-sódica y alteración propilítica. 2) Alteraciones por metasomatismo de hidrogeniones (H<sup>+</sup>): alteración filica, alteración argílica y alteración argílica avanzada. El estudio de la alteración hidrotermal desempeña un papel central en la exploración de yacimientos metalíferos.

**ALTERACIÓN POTÁSICA** (en inglés: *potassic alteration*): Es una alteración de origen hipógeno (= hipogénico) y de alta temperatura (600°- 400°C), que da lugar a la formación de minerales propios de las últimas etapas de la cristalización magmática, como feldespato potásico (ortoclasa = ortosa) y biotita, a expensas de plagioclasa y de piroxeno o anfíbol respectivamente. La relación K<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> es alta. A ella se asocia la principal mineralización hipógena de los pórfidos cupríferos. Normalmente está acompañada por el depósito de anhidrita (CaSO<sub>4</sub>).

**ALTERACIÓN PROPILÍTICA** (en inglés: *propylitic alteration*): Se caracteriza por minerales como clorita, epidota, albita, calcita y hematita (= hematites). En los pórfidos cupríferos constituye una alteración contemporánea a la potásica, pero externa al sistema mineralizador, y contiene solamente pirita. En cambio, alberga la mineralización principal en yacimientos cupríferos tipo manto (en especial, en sus facies ricas en clorita-albita, con transición a sericita ). A mayor temperatura (450°-500°C) gradúa a alteración calco-sódica, que acompaña la mineralización principal de los yacimientos ferríferos cretácicos del norte de Chile y sur del Perú.

**ALUNITAS**: Grupo de minerales característicos de la alteración argílica avanzada, pero que también pueden tener origen supérgeno (= supergénico). La alunita es un sulfato de Al y K (KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>) y el grupo de las alunitas tiene una composición general de AB<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>, donde A puede ser K, Na, Ca, Pb, Ag, o NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, y B puede ser Al, Cu o Fe. Las alunitas están presentes en la roca ornamental combarbalita (norte de Chile).

Las alunitas son importantes en la exploración de yacimientos epitermales de alta fugacidad de azufre y de oxígeno.

**ALUVIAL:** Se refiere a los sedimentos clásticos que han sido arrastrados por corrientes de agua. En esos sedimentos se pueden producir concentraciones de minerales con alto peso específico, como casiterita ( $\text{SnO}_2$ ), oro y platino, dando lugar a los yacimientos tipo "placer". Cuando el transporte ha sido limitado (como en el caso de un cono que recibe sedimentos provenientes del regolito del cerro), se utiliza el término coluvial. Debido a su transporte, los sedimentos aluviales presentan mejor selección granulométrica y redondeamiento que aquellos de carácter coluvial.

**AMALGAMACIÓN:** Amalgama es una solución sólida formada por dos o más metales. Puesto que el mercurio se presenta en estado líquido y tiene la capacidad de amalgamar el oro y otros metales se ha utilizado en la recuperación del oro presente en finas partículas. Así, el oro es amalgamado por el mercurio, del cual se separa posteriormente mediante destilación por calentamiento del Hg. Este método, que implica problemas ambientales debido a la toxicidad del Hg, fue reemplazado en la minería moderna por el de cianuración del oro (algo más segura aunque no exenta de riesgos ambientales). Sin embargo, ha sido y continúa siendo utilizado por la minería artesanal, con los problemas ambientales y de salud que ello implica. Este ha sido el caso, por ejemplo, de Andacollo en la Región de Coquimbo (Chile).

**AMBIENTE DE SEDIMENTACIÓN:** El término se refiere al conjunto de características físicas (energía cinética, temperatura), químicas (pH, Eh, composición de soluciones) y biológicas, de un sitio en el que se depositan sedimentos. Los ambientes de sedimentación tienen cierta importancia en la exploración de algunos tipos de yacimientos metalíferos (como los de uranio tipo *roll-front*, placeres aluviales, etc.). Sin embargo, su mayor importancia radica en la exploración de depósitos de combustibles fósiles (petróleo, esquistos bituminosos, carbón), genéticamente asociados a sedimentos de grano fino depositados en ambientes reductores.

**ANATEXIA:** Proceso de formación de magmas de composición granítica-riolítica por fusión parcial de rocas corticales. Los granitos de anatexia se caracterizan por la presencia de muscovita (= moscovita) (granitos de dos micas).

**ANDESITA:** Roca ígnea de composición intermedia y textura afanítica, microcristalina o porfírica, de emplazamiento extrusivo o intrusivo sub-volcánico. Su mineralogía incluye plagioclasa calco-sódica, piroxeno y anfíbola. Corresponde a la diorita como roca fanerítica. Las andesitas son rocas muy abundantes en los arcos magmáticos de tipo

andino así como en los arcos de islas. La asociación andesita-dacita/diorita-granodiorita es muy rica en mineralizaciones de Cu, Mo, Au, Fe y otros metales.

**ANFÍBOLAS (ANFÍBOLES):** Son inosilicatos de cadena doble. En las rocas ígneas se presentan normalmente como hornblenda. En la alteración hidrotermal están generalmente bajo la forma de actinolita (de aspecto fibroso). Ver además actinolita.

**ANOMALÍA:** Rasgo o conducta de un sistema que se aparta del comportamiento normal o esperado. En exploración minera las anomalías geoquímicas y las anomalías geofísicas son muy importantes, como indicadoras de la presencia de yacimientos no aflorantes. Ver además geofísica y geoquímica.

**ARCILLAS (en inglés: *clay minerals*):** Grupo de minerales del grupo composicional de los aluminosilicatos, con estructura de filosilicatos. Generalmente se forman por meteorización o alteración hidrotermal de feldespatos o micas. Las arcillas están constituidas por capas de Si-O con coordinación tetraédrica (T) y capas Al-O con coordinación octaédrica (O). Existen dos tipos principales: el de la caolinita y el de la montmorillonita o esmectita. El primero presenta alternancia de capas T-O, las cuales se atraen fuertemente. En el segundo, se presenta una configuración TOT-TOT, siendo débiles los contactos T-T. Ello conlleva que las esmectitas presenten una gran superficie interna, que les permite intercambiar cationes, así como incorporar moléculas de agua y expandirse. Ambas características pueden tener graves consecuencias, tanto en la lixiviación en pilas de minerales de cobre (que se dificulta mucho por la pérdida de permeabilidad y por la incorporación del cobre a la arcilla), como en la estabilidad de obras de ingeniería (suelos expansivos). Sin embargo, tienen también aplicaciones útiles, como en el caso de los barros (= lodos) utilizados en sondajes (= sondeos). Las arcillas son importantes minerales industriales y tienen uso diagnóstico en exploración minera. Ver además alteración hidrotermal.

**ARCO MAGMÁTICO:** Se denomina así a la faja de generación de magma situada sobre una zona de subducción. Ese magma se emplaza a distintos niveles de profundidad: plutónico, hipabisal, subvolcánico y volcánico y está asociado a distintos tipos de yacimientos metalíferos, como pórfidos cupríferos (a nivel hipabisal) y epitermales (a nivel subvolcánico). La Cadena Andina incluye un importante arco magmático, que en Chile migró de W a E entre el Jurásico y el Terciario superior y que hoy coincide aproximadamente con la posición de la Cordillera de los Andes. En el sureste de España se reconoce un arco magmático del Mioceno con similitudes a la Cadena Andina aunque diferente en cuanto origen (ausencia de subducción). Se trata de la Faja Volcánica de Almería-Cartagena (Mioceno Medio-Superior), que se formó durante el colapso

gravitacional del orógeno alpino. Tiene escasa longitud y ancho (~ 160 x 20 km), sin embargo es extremadamente rica en variedades petrográficas y series magmáticas (calcoalcalina, calcoalcalina de alto K – shoshonítica, y lamproítica) y alberga interesantes yacimientos epitermales de Au (Rodalquilar), Pb-Zn (Mazarrón, Cabezo Rajao), y Sn (La Crisoleja).

**ARENAS ALQUITRANADAS (ARENAS BITUMINOSAS):** En inglés: *tar sands*. Cuando los yacimientos de petróleo son despojados por la erosión de su techo impermeable protector, los constituyentes de menor peso molecular, y por lo tanto más volátiles, abandonan las rocas almacenadoras. En consecuencia, estas conservan solamente las fracciones pesadas semi-sólidas tipo alquitrán o asfalto. Estos yacimientos pueden ser explotados por métodos mineros, seguidos de molienda y destilación del material. Posteriormente el destilado es sometido a *cracking* (fraccionamiento molecular), obteniéndose un producto similar al petróleo. En la región de Alberta en Canadá existen enormes yacimientos en explotación de este tipo. Sin embargo, explotarlos plantea serios problemas ambientales, entre ellos la generación de grandes volúmenes de arenas que es necesario disponer y estabilizar.

## B

**BANDEAMIENTO (BANDEO):** Estructura o textura que presentan algunas menas que han sido depositadas en un medio abierto y en un proceso “por etapas”, por ejemplo, en un plano de falla que se fue abriendo por pulsos sucesivos, cada uno de los cuales dio origen a una banda de minerales. Los minerales sulfurados de cobre del Distrito Talcuna (Chile: Quebrada Marquesa, Región de Coquimbo) presentan atractivas estructuras bandeadas.

**BESSHI:** Tipo de yacimiento definido en Japón, constituido por capas finas, con estructura masiva o bien laminada, de piritita, pirrotina (= pirrotita) y calcopiritita, con contenidos variables de oro. Se sitúan en rocas sedimentarias clásticas, intercaladas con lavas y rocas piroclásticas andesítico-basálticas. Incluyen óxidos de Fe y jaspe (= chert). Su origen se atribuye a fuentes termales submarinas situadas en medios reductores, en ambientes tectónicos tipo rift, situados en arcos de islas o en cuencas trasarco. Este tipo de yacimiento presenta ciertas analogías con algunos yacimientos tipo manto de edad cretácica en Chile central.

*BIF*: Del inglés: *banded iron formation* (formación ferrífera bandeada = formación bandeada de hierro). Son depósitos constituidos por bandas intercaladas de sílice y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) que alcanzan gran magnitud (cientos a miles de Mt). Se trata de depósitos antiguos, en general de edad precámbrica, que presentan metamorfismo y se encuentran normalmente en regiones de escudo, como los de Norte América, Australia y Brasil. Las BIFs se clasifican en dos tipos principales según estén o no asociadas a rocas volcánicas. En el primer caso tenemos las BIF del tipo Algoma y en el segundo las BIF del tipo Lago Superior. En Chile existen depósitos pequeños de este tipo (< 100 Mt) en la Cordillera de Nahuelbuta, que fueron acrecionados al continente en un episodio tectónico ocurrido durante el Paleozoico. Los yacimientos tipo BIF aportan la mayor parte del hierro de mina producido en el mundo.

**BITUMINOSO**: Carbón mineral de calidad intermedia caracterizado por su mayor contenido de hidrocarburos sólidos (bitumen).

*BOXWORKS*: Ver celdillas residuales.

**BONANZA**: La parte más ancha y más rica en minerales de valor económico de un filón (= veta). En filones polimetálicos, es también la más enriquecida en plata. Una zona de bonanza puede originarse por la intersección de dos fallas mineralizadas (“clavo de bonanza”).

**BRECHA**: Roca constituida por clastos angulares de tamaño centimétrico, decimétrico o métrico (megabrecha), que contiene un material más fino (matriz) y un cemento que los une. Las brechas tienen distintos orígenes: sedimentarias, piroclásticas, magmáticas, tectónicas (brechas de zona de falla), hidrotermales, etc. En depósitos como los del tipo “chimenea de brecha” pueden contener parte importante de la mineralización del yacimiento.

## C

**CALCOPIRITA**: Es el sulfuro primario de cobre más importante. Su fórmula es  $\text{CuFeS}_2$  y pertenece al sistema cristalino tetragonal. Su color es amarillo bronceado, con menor brillo que la pirita. A diferencia de ésta, rara vez exhibe su forma cristalina externa.

**CALCOSINA**: Es el sulfuro más rico de cobre. Su fórmula es  $\text{Cu}_2\text{S}$  y pertenece al sistema cristalino monoclinico o hexagonal dependiendo de la temperatura de formación.

Generalmente se forma por enriquecimiento supérgeno (= supergénico) o hipógeno (= hipogénico) de otros sulfuros primarios. Su color es gris y su brillo moderado lo que lo hace poco notable. Cuando se iniciaron las exploraciones de cobre en las secuencias sedimentarias del cinturón cuprífero africano (*Copper Belt* de Zambia-Katanga), la calcosina presente en rocas sedimentarias finas de color gris oscuro pasó inicialmente desapercibida.

**CALDERA:** Es una gran depresión de origen volcánico, de forma elíptica o circular, que puede alcanzar decenas de km de diámetro. Se forma cuando el magma sale bruscamente, dejando un espacio bajo la estructura volcánica, la cual colapsa formando la caldera. Estructuras de este tipo se encuentran (por ejemplo) en Condoriaco, al NE de La Serena (Chile) o en Rodalquilar (España). La erupción de material por una caldera no genera condiciones favorables para la formación de yacimientos metalíferos (pérdida masiva de volátiles). Sin embargo, si una nueva masa magmática se sitúa bajo ella generando una “caldera resurgente”, las fallas normales presentes en su borde así como en el interior de estas (calderas “anidadas”) son adecuadas para la localización de depósitos epitermales.

**CÁMARAS Y PILARES** (en inglés: *room and pillar*): Es un método de explotación especialmente adecuado para yacimientos tabulares horizontales o moderadamente inclinados, como los depósitos cupríferos del tipo manto (estratiformes) encajados en rocas competentes. A medida que el cuerpo mineralizado va siendo extraído, se van dejando pilares entre su base y su techo para asegurar la estabilidad de la explotación. Tanto el diámetro como el espaciamiento de los pilares dependen de las propiedades geomecánicas de las rocas encajantes, así como de la potencia del cuerpo explotado. Los mantos cupríferos en rocas volcánicas, así como los depósitos tipo skarn del centro y norte de Chile, se adaptan muy bien a este método.

**CAOLINITA:** Mineral del grupo de las arcillas. Su estructura cristalina está configurada por capas tetraédricas Si-O y octaédricas Al-O alternadas, lo que asegura una unión estrecha entre las capas (y dificulta el intercambio de bases y la incorporación de agua). Por lo tanto no es una arcilla expansiva. Se forma por meteorización química de las rocas en condiciones de clima lluvioso, así como por alteración hidrotermal con fuerte metasomatismo de H<sup>+</sup>. Ver además alteración argílica y alteración argílica avanzada.

**CARBÓN:** Combustible fósil sólido, formado mayoritariamente por carbono. Los yacimientos de carbón se forman principalmente en ambientes transicionales (p.ej. deltas) subsidentes y clima húmedo, donde repetidos episodios de hundimiento cubren de agua y luego de sedimentos clásticos finos una abundante vegetación. Tanto por

efectos bioquímicos (bacterias anaeróbicas) como geoquímicas ( $T^{\circ}$  y  $P$ ), la materia orgánica vegetal pierde su contenido de hidrógeno y oxígeno, enriqueciéndose en carbono. A diferencia del caso del petróleo, la presión o la temperatura alta no dañan sino que mejoran la calidad del carbón, el cual tampoco es afectado por procesos estructurales. En consecuencia, los mejores carbones son los más antiguos (Carbonífero-Pérmico), que se distribuyen principalmente en los continentes del hemisferio norte y que corresponden a los tipos de hulla y antracita (en España: cuencas mineras de Asturias y León). Son aptos para la producción pirolítica de coque, utilizado en la metalurgia del hierro y constituyen una fuente principal para la generación de energía eléctrica en plantas térmicas. Los carbones de menor calidad de tipo lignito (generalmente de edad terciaria, como los de Lota y Magallanes en Chile) se utilizan principalmente en producción de energía eléctrica. En términos ambientales, el carbón presenta dos problemas mayores. Uno es la generación de  $SO_2$  debida a la oxidación de la pirita presente en el carbón, la cual ocurre durante su combustión, y que es causa de la producción de "lluvia ácida". El otro es la emisión de  $CO_2$  (gas de efecto invernadero) por combustión del carbón. Otro problema del carbón radica en los contenidos de elementos metálicos de sus cenizas (importantes en los carbones más jóvenes). Por otra parte, su explotación es peligrosa para los mineros debido a las explosiones de metano ( $CH_4$ : gas grisú) que se encuentra adsorbido en el carbón. Un aspecto favorable del carbón radica en la cuantía de sus reservas conocidas, que podrían abastecer las necesidades de varios siglos, aunque el problema del calentamiento global asociado al efecto invernadero plantea serias objeciones en este aspecto.

**CARBONATITAS:** Rocas alcalinas formadas por magmas constituidas principalmente por carbonatos de Ca, Mg y Fe, con débil participación de silicatos. A las carbonatitas se asocian importantes yacimientos de elementos de las tierras raras, de uranio y otros elementos asociados al magmatismo alcalino, así como de magnetita, apatita (= apatito) y ocasionalmente cobre (p.ej. yacimiento de Palabora en Sudáfrica). Las carbonatitas son características de ambientes tectónicos corticales tipo escudo y aparecen bajo la forma de chimeneas de brecha. También existen ejemplos en el vulcanismo de islas como Canarias y Cabo Verde (Atlántico Central).

*CARLIN:* Modelo de yacimiento aurífero representado por los depósitos del distrito del mismo nombre en el Estado de Nevada (USA). Los depósitos tipo Carlin son de carácter diseminado y se encuentran emplazados en rocas pelíticas (clásticas de grano fino) ricas en materia orgánica reductora y con presencia de facies carbonatadas. Están asociados a una alteración hidrotermal que silicifica la roca, pero que cambia poco su apariencia externa, lo que dificulta su detección mediante imágenes satelitales. En Chile, se asemejan a esta tipología los yacimientos de El Hueso y Agua de la Falda en Atacama.

Un blanco adecuado en Chile para la exploración de este tipo de depósitos puede ser la presencia de afloramientos de rocas pelíticas jurásicas en la faja de alteraciones hidrotermales de El Indio y otros depósitos epitermales terciarios.

**CÁTODOS:** La producción de cátodos electrolíticos de alta pureza (99.99% Cu) ha correspondido tradicionalmente a la etapa final de la pirometalurgia del cobre. Por otra parte, el tratamiento mediante extracción por solventes (de las soluciones provenientes de la lixiviación en pila de minerales de cobre) y posterior electrorecuperación (*SX-EW*) también produce cátodos de cobre electrolítico de elevada calidad, que pueden ser comercializados en términos ventajosos. Este ha sido el caso en el norte de Chile de Carmen de Andacollo, Radomiro Tomic (RT) y otras explotaciones modernas de lixiviación o biolixiviación en pila. Ver además lixiviación en pila.

**CELDAS DE CONVECCIÓN:** La convección (transporte de energía térmica con la materia) es una de las tres formas de transmisión de calor (junto con la conducción y la radiación electromagnética de baja frecuencia). La convección juega un rol esencial en el manto terrestre y en la corteza, tanto en la forma de ascenso de magmas como de las celdas de convección de manto astenosférico (que explican el movimiento de las placas tectónicas). La convección también es muy importante en los niveles corticales superiores cuando se emplaza un cuerpo magmático e interactúa con los niveles profundos de aguas subterráneas. Esta juega un papel principal en la génesis de yacimientos hidrotermales, así como en los sistemas geotérmicos (utilizados en la producción de energía eléctrica). El concepto de celdas de convección se refiere a la configuración de patrones de flujo ordenados de fluidos ascendentes de mayor temperatura y fluidos descendentes de temperatura menor (y por lo tanto, de mayor densidad).

**CELDILLAS RESIDUALES (FANTASMAS):** En inglés: *boxworks*. Estructuras tipo celdillas que quedan en las rocas cuya mineralización sulfurada fue oxidada y lixiviada. A partir de la forma de las celdillas (vacías o rellenas por goethita u otras limonitas) los geólogos expertos en su estudio pueden deducir el contenido mineralógico original (p.ej. pirita, calcopirita, esfalerita, etc), lo que es muy útil en exploración minera. Las celdillas residuales (también llamadas “fantasmas” en España) se encuentran en la zona superficial de los yacimientos sulfurados oxidados y meteorizados, también denominada gossan o “sombbrero de hierro”. Esta zona destaca por la presencia de sílice y de óxidos de hierro, que le dan colores llamativos como el rojo, amarillo, marrón rojizo y violáceo, según la proporción de jarosita (sulfato de Fe y K), goethita y hematita (= hematites). El color resultante de la proporción de los distintos minerales oxidados de Fe del gossan tiene valor diagnóstico en exploración, en particular de pórfidos cupríferos.

*CHERT* (en español: jaspe). Precipitado silíceo de origen sedimentario o hidrotermal. Si es rico en Fe se denomina jaspe ferruginoso. Puede presentar variada coloración, siendo el rojo un color frecuente y es normal que presente bandeo (con bandas de distinto color).

CHIMENEA DE BRECHA (en inglés: *breccia pipe*): También se denominan diatremas. Se trata de estructuras de origen eruptivo, formadas por fluidos de alta presión que generan estructuras cilíndricas profundas. Las chimeneas de brecha están constituidas por clastos angulares de la roca encajadora, desplazados por la presión de los fluidos y corroídos por la acción de las soluciones hidrotermales. Las chimeneas de brecha presentan frecuentemente turmalina (etapa neumatolítica) y alteración hidrotermal fílica (cuarzo-sericítica) así como mineralización de Cu, Cu-Mo, Au, polimetálica, etc. Esta última se encuentra en forma de matriz en la brecha, así como en fracturas circulares periféricas. La distribución de la mineralización al interior del cuerpo de brecha puede ser muy irregular. Aparte de las chimeneas de brecha menores, que se pueden presentar en enjambres (p.ej., Inca de Oro, Atacama), hay un tipo de depósitos del modelo pórfido cuprífero al cual pertenece el gran distrito Los Bronces-Río Blanco (Chile central). Un fenómeno análogo a las chimeneas de brecha es el de los diques de guijarros (*pebble dikes*), consistentes en cuerpos tabulares verticales compuestos por clastos de la roca encajadora que han ascendido y experimentado redondeamiento por el efecto de fluidos de alta presión. Se encuentran estructuras de este tipo en el pórfido cuprífero de El Salvador (Región de Atacama), así como en la caldera de El Cinto en Rodalquilar (España).

CHIPRE (yacimientos cupríferos tipo Chipre): Es un tipo de yacimiento definido conforme a sus manifestaciones en la Isla de Chipre (donde se realizaron las primeras explotaciones de cobre del mundo). Estos depósitos, constituidos por mineralizaciones de pirita y calcopirita emplazadas en rocas basálticas ofiolíticas ("rocas verdes") se forman en dorsales oceánicas, e integran el amplio grupo de los yacimientos tipo sulfuros macizos (= sulfuros masivos). Comparten con los depósitos cupríferos tipo manto de Chile el carácter básicamente cuprífero de su mineralización, así como su asociación a rocas volcánicas máficas alteradas.

CIANURACIÓN: Por su carácter de metal noble el oro tiene dificultad para oxidarse y por lo tanto, para disolverse en forma iónica simple, la que sólo es posible en presencia de mezclas ácidas muy oxidantes, como la del agua regia (HCl + HNO<sub>3</sub>). Sin embargo, el oro puede disolverse en condiciones de oxidación menos energéticas si lo hace como ión complejo. Este es el caso del ión Au(CN)<sub>2</sub><sup>2-</sup> que se forma por reacción del oro con cianuro de sodio (NaCN) en medio alcalino:  $2\text{Au} + 4\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Au}[(\text{CN})_2]^{2-} +$

$2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}_2$ . La cianuración en pila, es un método barato y muy efectivo, a condición de que el oro esté libre (vale decir, no encapsulado en otro mineral) y que no haya otros metales abundantes que compitan con el oro por el cianuro. Por otra parte, evita la amalgamación con mercurio, que ofrece dificultades ambientales por la toxicidad del Hg. Sin embargo, también la cianuración ofrece riesgos que deben ser manejados con prudencia. Desde luego, si baja el pH se forma HCN (el mismo compuesto que se usa para ajusticiar condenados a muerte en la cámara de gases en USA). También el CN<sup>-</sup> puede contaminar el agua subterránea (y se trata de un veneno potente). Ello explica que las comunidades vecinas tiendan a resistir este método de beneficio de minerales, a veces enérgicamente (caso del yacimiento de Esquel, Argentina, de la empresa Meridian Gold). Pero a diferencia del mercurio, el cianuro tiende a descomponerse naturalmente en sustancias inofensivas. Por otra parte, tampoco se trata de un tóxico acumulativo (como el Hg o el As). Sin embargo, desastres como el de la mina de oro de Baia Mare (Rumanía; Febrero de 2000) llevaron al derrame de 100.000 m<sup>3</sup> de solución cianurada al río Tisza (un tributario del Danubio,) lo que ocasionó un desastre ecológico de gran magnitud, con la muerte masiva de peces a lo largo del río.

**CIELO ABIERTO (CORTA):** En inglés: *open pit, open-cut mining*. Se denominan así las explotaciones mineras no subterráneas, las cuales corresponden a dos tipos principales: el rajo abierto común (*open pit*: Chuquicamata, El Romeral, etc.) y la explotación en la pared del cerro, al estilo de una cantera (*open-cut*: La Coipa). Estas operaciones se denominan corta en España. Las explotaciones a cielo abierto ofrecen ventajas económicas claras si el cuerpo mineralizado se extiende en tres dimensiones (XYZ) o en la horizontal (XY) y no tiene una gran cubierta de estéril. En condiciones de clima húmedo o semiárido moderado, el rajo (= corta) puede albergar un lago al fin de la explotación, que debe ser monitoreado en términos ambientales, especialmente por el riesgo de contaminación de aguas subterráneas por metales asociados al drenaje ácido. Esta solución final suele ser particularmente atractiva en el caso de explotaciones de carbón o arcillas, donde el riesgo de drenaje ácido es mucho menor (o inexistente en el caso de arcillas) que en los yacimientos metálicos ricos en pirita.

**CLORITA:** Filosilicato afín con los minerales micáceos, que se forma por alteración hidrotermal de otros minerales ferromagnesianos de mayor temperatura (piroxenos, anfíbol, biotita). Es característico de la alteración propilítica y de la alteración transicional propilítica-fílica. En la mayoría de los yacimientos cupríferos tipo manto, la asociación clorita-sericita, junto con la albita, presentan la relación más directa con la mineralización.

**COLOFORME:** Textura de depósito de los minerales de una mena cuyo aspecto es similar al que presenta una sustancia de origen coloidal. Es propia de condiciones de depósito lentas y de baja temperatura.

**COMPETENTE** (en inglés: *competent*): Roca cuyo comportamiento es tanto resistente como elástico y frágil. Frente a un esfuerzo, tienden a deformarse conforme a la Ley de Hooke y a recuperarse si no se sobrepasa su resistencia. En cambio, su dominio de comportamiento plástico es reducido, por lo cual la roca tiende a fracturarse rápidamente después de sobrepasada su resistencia elástica. Las rocas ígneas de grano fino, no alteradas ni fracturadas son muy competentes. En cambio, las rocas clásticas pelíticas, ricas en minerales de arcilla, son muy poco competentes (rocas plásticas). Sin embargo, el comportamiento de una roca depende también de la temperatura y presión que la afectan, de su contexto litológico-estructural, así como de la brusquedad o gradualidad con la que se le aplica un esfuerzo.

**COMPLEJOS METÁLICOS SOLUBLES:** Ver iones metálicos complejos.

**CONTACTO:** Plano o volumen recto o curvo que separa dos unidades geológicas. Puede corresponder a planos nítidos y objetivos, como las paredes de un dique que corta rocas estratificadas. También puede corresponder a un volumen, en el caso de un contacto transicional, difuso. El término metamorfismo de contacto se refiere a los efectos mineralógicos producidos en rocas estratificadas por una intrusión ígnea que las corta. Estos efectos se localizan en la aureola de contacto que rodea a dicha intrusión.

**CONTROL:** Se denomina así al efecto regulador de un agente o parámetro sobre la evolución de un sistema o proceso. En el estudio de los yacimientos metalíferos es esencial determinar el control ejercido por la litología (control litológico) y por las estructuras (control estructural) en la distribución de la mineralización económica. De igual manera, ambos controles influyen en la distribución de los cuerpos mineralizados a escala local, distrital, regional y de fajas metalíferas a escala continental. En consecuencia son factores claves en la exploración geológico-minera.

**CORRIDA** (en Chile): Se denomina así a la extensión del afloramiento de un cuerpo mineralizado a lo largo de su dimensión mayor, por ejemplo, la corrida de una veta.

**CRATÓNICO:** Ambiente continental cortical. Por ejemplo, un escudo es un cratón de gran dimensión. Los ambientes cratónicos son propicios para determinados tipos de mineralizaciones, como las chimeneas diamantíferas (diatremas kimberlíticas) o las asociadas al magmatismo alcalino, como las carbonatitas con uranio y tierras raras.

También se presentan en ambientes cratónicos los yacimientos de cromita y platinoides, relacionados con intrusiones estratificadas lopolíticas máficas-ultramáficas, como el Complejo de Bushveld en Sudáfrica.

**CUENCA DE SEDIMENTACIÓN:** Dominio geológico deprimido y generalmente subsidente, que recibe sedimentos provenientes de la erosión de otros dominios situados a mayor altura. Las cuencas de sedimentación pueden ser continentales, transicionales, como el ambiente de los deltas o bien marinas. La plataforma marina es un ambiente de sedimentación muy importante para la formación de yacimientos de petróleo, así como lo son los ambientes transicionales subsidentes de zonas húmedas para la formación de depósitos de carbón.

## D

**DECOLORACIÓN (BLANQUEO):** En inglés: *bleaching*. Efecto de blanqueo (en Chile: blanqueamiento) de las rocas debido a la alteración y disolución de sus minerales ferromagnesianos por efecto de soluciones hidrotermales o por la meteorización de rocas ricas en piritita (cuya oxidación genera condiciones ácidas). La decoloración es una guía utilizada en las primeras etapas de la exploración minera, debido a su fácil detección en el terreno o en imágenes aéreas o satelitales.

**DEPÓSITO MINERAL:** Ver yacimiento mineral

**DESARROLLO:** Se denomina desarrollo a las labores de preparación de la explotación de un yacimiento, como la construcción de piques (= pozos) y galerías. Generalmente es una etapa que implica más gastos que provecho económico directo. Sin embargo, si la mena extraída en esa etapa es rica, el desarrollo puede ser directamente rentable, como ocurrió en el caso del yacimiento aurífero de El Indio (Región de Coquimbo, Chile).

**DESMONTES (ESCOMBRERAS):** En inglés: *mineral dumps, mine wastes*. Son acumulaciones de rocas estériles o con concentraciones subeconómicas de minerales, que podrían ser susceptibles de tratamiento futuro a través de métodos complementarios. Es muy importante asegurarse de que el sitio de depósito de los desmontes (en España: escombreras) no contenga mineralizaciones que obliguen a su posterior remoción (como en el distrito de Chuquicamata, Chile). También es necesario separar los depósitos de desmontes conforme a su ley y mineralogía. Los desmontes

deben ser considerados cuidadosamente con relación al futuro cierre de las explotaciones, puesto que pueden ser focos de generación de drenaje ácido.

**DESPOLIMERIZACIÓN:** En un magma, los futuros minerales existen bajo la forma de estructuras moleculares polimerizadas, a partir de las cuales se forman los cristales al descender la temperatura. Sin embargo, una sustancia como el agua disuelta en el magma produce la rotura de los enlaces polimerizados (efecto despolimerizador), lo cual genera mayor fluidez y retarda su proceso de cristalización, permitiendo su ascenso hasta niveles corticales superiores.

**DESPROPORCIÓN:** Es un proceso simultáneo de oxidación y reducción que desempeña un rol esencial en el comportamiento del azufre en las etapas neumatolítica e hidrotermal de la cristalización magmática. Su importancia deriva del hecho de que el azufre de los magmas necesita pasar de la forma  $S^{2-}$  a la forma  $S^{4+}$  ( $SO_2$ ) para pasar a la fase neumatolítica y participar en los procesos de mineralización (de ahí la importancia de los magmas oxidados, como los de la serie con magnetita de Ishihara. Sin embargo, el depósito de minerales sulfurados requiere la presencia del ión  $S^{2-}$ . Ello se logra a través del mecanismo de desproporción, que implica la oxidación y reducción simultánea del  $S^{4+}$ , conforme a la ecuación:  $4S^{4+} \rightarrow S^{2-} + 3S^{6+}$  lo que da lugar a la formación conjunta de los iones sulfuro y sulfato. En los niveles hipotermales el ion sulfato se presenta como anhidrita (sulfato de calcio), mineral abundante de la zona potásica de los pórfidos cupríferos. Ver además: oxidación.

**DIAGENÉTICO:** Se dice de un mineral formado o removilizado durante la etapa diagenética de un sedimento (vale decir, aquella durante la cual se produce su compactación y litificación). Durante esa etapa se pueden formar notables estructuras, como las de tipo cebra presentes en algunos yacimientos estratiformes de blenda (= esfalerita): bandas claras y oscuras mineralizadas alternadas. La diagénesis desempeña un papel principal en la formación de yacimientos de Pb-Zn en rocas carbonatadas, como los de tipo Mississippi Valley.

**DIAPIRO:** Cuerpo intruído de manera forzada, por el efecto de fuerzas que generan un impulso vertical hacia la superficie, de manera que el cuerpo corta las rocas que encuentra en su camino. Un diapiro puede haber intruído en estado fundido o bien en estado sólido-fluido. Este último es el caso de los domos de sal, donde la presión vertical sobre un estrato salino produce su intrusión vertical a través de una zona de debilidad. También se genera un efecto diapírico cuando rocas ultramáficas (peridotitas) son comprimidas entre dos placas tectónicas por efecto de la acreción de un terreno a una

placa continental. Este es el caso de los cuerpos ultramáficos con débiles contenidos de cromitas podiformes de la Cordillera de Nahuelbuta (Chile).

DIATREMA: Ver chimenea de brecha.

DIFUSIÓN: Fenómeno físico-químico en el cual la materia migra a través de un sólido, líquido o gas por efecto de un gradiente de concentración, temperatura o presión. La difusión obedece a la tendencia natural de los sistemas a alcanzar su equilibrio termodinámico.

DIGENITA: Forma isométrica (= cúbica) de la calcosina, también llamada calcosina azul. Su presencia en estructuras de desmezcla con covelita (= covellina) (CuS) o calcosina indica que cristalizó a más de 80°C y por lo tanto, es de origen primario, endógeno (y no se debe al enriquecimiento secundario de otros sulfuros). Ver además: calcosina.

DIQUE (en inglés: *dike*): Cuerpo intrusivo tabular y discordante, de origen ígneo, emplazado a lo largo de una fractura. Puede ocurrir que el mismo plano de fractura controle primero el emplazamiento de un dique, y posteriormente el de una veta (= filón) adyacente.

DIQUE DE GUIJARROS: Ver chimeneas de brecha.

DIQUE ANULAR: Dique presente en una estructura volcánica circular subsidente. Son especialmente notables en el caso de las grandes calderas volcánicas, donde en la periferia se emplazan diques anulares. La presencia de estos diques puede coincidir con la de los canales de circulación de soluciones hidrotermales posteriores si se mantienen las condiciones extensionales que permitieron su emplazamiento. En la Caldera de Condoriaco (Región de Coquimbo, Chile) existen diques anulares fuertemente silicificados.

DISEMINADA: Tipo de textura en la cual la mineralización se presenta bajo la forma de una fina impregnación de la roca mineralizada. Su presencia indica que la roca encajadora permitió el paso de la solución hidrotermal a través de su permeabilidad primaria o de una red muy fina de fracturas.

DISPERSIÓN: Proceso por el cual una substancia concentrada en un volumen limitado pasa a distribuirse en un volumen mayor, disminuyendo proporcionalmente su concentración. El concepto de dispersión secundaria alude a aquella que se produce cuando un yacimiento mineral es afectado por meteorización y erosión, permitiendo la

migración de sus constituyentes. Esto genera anomalías geoquímicas y mineralógicas secundarias en torno al área mineralizada, lo cual es utilizado en exploración minera. Especialmente importante es aquella dispersión realizada por el drenaje. La dispersión debe ser considerada también en términos ambientales, puesto que ella implica contaminación. Al respecto, tanto las actividades mineras como las metalúrgicas pueden acelerar los procesos naturales de dispersión, lo cual debe ser considerado durante la explotación y el posterior cierre de las explotaciones mineras.

**DISTAL:** Posición alejada de un cuerpo mineralizado respecto a la fuente primaria a la que se atribuye la mineralización. Se opone a la de una posición cercana o proximal. Estos conceptos se han utilizado principalmente en el estudio de yacimientos sulfurados del tipo sulfuros macizos (= masivos) depositados en el fondo marino respecto a las fuentes (p.ej. chimeneas hidrotermales = *black smokers*).

**DISTRITO MINERO:** Se denomina así a un conjunto de minas presentes en un área geográfica de extensión limitada (algunos km). Ejemplos de distritos de la Región de Coquimbo en Chile son los de Condoriaco (Ag-Au), Talcuna (en Quebrada Marquesa, Cu), El Indio-Tambo (Au-Cu-As) y Andacollo (Au-Cu). En España son famosos los distritos de La Carolina (Pb-Zn-Cu-Ag) o La Unión (Pb-Zn-Ag).

**DOMINIOS METALOGÉNICOS:** Concepto propuesto por el metalogenetista francés P. Routhier, según el cual existen dominios geográficos en forma de bandas (provincias) en los distintos continentes, definidos por la presencia de determinados metales que aparecen reiteradamente en dichos dominios en yacimientos de distinta edad y tipología. Por otra parte, la presencia de yacimientos se relaciona con la existencia de cuerpos magmáticos, fallas u otros elementos geológicos que intersectan el dominio, los cuales son considerados como reveladores de su potencial metalogénico (atribuido a la concentración anormal de esos metales en los niveles corticales subyacentes).

**DOMO:** Cuerpo o estructura en forma de champiñón o bombilla (= ampolleta). Existen cuerpos ígneos volcánicos o subvolcánicos, formados por magmas ricos en sílice, que adoptan esta forma. Algunos domos subvolcánicos están asociados a mineralización epitermal en relleno de fracturas que cortan radialmente al domo. En el ambiente volcánico, el colapso de un domo puede acompañar a una erupción catastrófica (riesgo actual, Febrero de 2009, en el Volcán Chaitén, Chile). También existen domos estructurales, correspondientes a pliegues tipo anticlinal, que en planta presentan forma circular.

**DRENAJE ÁCIDO** (en inglés: *acid drainage*): Se denomina así al drenaje superficial o subterráneo procedente de rocas ricas en pirita afectadas por procesos de oxidación. Puesto que la pirita tiene un átomo de azufre “extra” en su composición ( $\text{FeS}_2$ ), al oxidarse en presencia de agua da lugar a la formación de sulfato ferroso y ácido sulfúrico. La posterior oxidación del  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  y la correspondiente hidrólisis del sulfato ferroso a férrico, agrega acidez a aquella producida por la ionización del  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Otros sulfuros metálicos pueden contribuir a la generación de acidez, pero solamente como consecuencia de su oxidación a sulfatos y la posterior hidrólisis de estos últimos. El efecto contaminante del drenaje ácido no se debe solamente a su acidez, sino que principalmente a la posibilidad de transporte en solución de metales como Cu, Zn, Cd, etc. La generación de drenaje ácido puede ser mitigada si existen rocas carbonatadas en el área mineralizada (puesto que el carbonato neutraliza los iones  $\text{H}^+$ ). También es mitigada por la presencia de rocas ígneas poco alteradas, que igualmente reaccionan con los hidrogeniones ( $\text{H}^+$ ) a través de la hidrólisis de sus silicatos. En cambio, la alteración argílica o argílica avanzada elimina esta posibilidad. El distrito de El Indio, actualmente cerrado, continúa siendo un centro generador de drenaje ácido y las características del distrito Pascua-Lama (nacientes del Río Huasco, Atacama, Chile), próximo a ser explotado, son igualmente favorables a la producción de acidez. En el Estado de Montana (USA) algunas operaciones de Cu y polimetálicos ya cerradas serán centros de generación indefinida (a la escala humana) de drenaje ácido, lo que obligará a su control permanente. El drenaje ácido, también puede ser generado por yacimientos de carbón, debido a los contenidos de pirita de este combustible fósil (lo cual complica el cierre de sus explotaciones).

## E

**EBULLICIÓN** (en inglés: *boiling*): La ebullición, vale decir, el paso brusco de un componente de una fase líquida a una gaseosa se produce cuando la presión de vapor sobrepasa la presión externa ejercida sobre el líquido. La ebullición tiene mucha importancia en términos metalogénicos. En etapas tempranas, durante el ascenso de un cuerpo magmático, la ebullición del agua contenida en el magma puede determinar su cristalización, puesto que el agua deja de desempeñar su papel despolimerizante (efecto fundente). También la ebullición de sustancias volátiles controla el desarrollo de la etapa neumatolítica, que pasa a la etapa hidrotermal al condensarse el agua por la disminución posterior de la temperatura. Durante la etapa hidrotermal también pueden ocurrir etapas de ebullición controladas por cambios de la presión que actúa sobre la solución. Tales fenómenos afectan la estabilidad de los metales disueltos como iones

complejos (al modificar el pH y las fases sulfuradas en solución) y tienen como consecuencia la precipitación de minerales económicos y de ganga. Puesto que la presión sobre los sistemas neumatolíticos e hidrotermales está controlada en parte por la permeabilidad y por las estructuras presentes en las rocas, los cambios litológicos y estructurales abruptos favorecen la ebullición y por lo tanto el depósito de masas ricas de mineralización metálica (como las de la zona de bonanza de los filones o vetas).

*ECONOMIC GEOLOGY*: En castellano: Geología Económica. Es el nombre de la principal publicación científico-profesional periódica internacional sobre yacimientos minerales (en particular de carácter metalífero). Es editada por la sociedad científico-profesional *Society of Economic Geologists* (SEG). Otra revista importante, editada por especialistas europeos, es *Mineralium Deposita*.

Eh: Es el potencial de reducción-oxidación (potencial redox) de un ambiente (por ejemplo, las aguas superficiales de un lago, un río, un cuerpo de aguas subterráneas muestreado en un pozo, el agua de una fuente termal, etc.). Es el resultado de la influencia de todas las reacciones de reducción-oxidación en que están implicadas las sustancias disueltas. El oxígeno disuelto ( $O_2$ ) juega un papel determinante en las condiciones de Eh de un medio. Tiene gran importancia en la formación de los yacimientos metalíferos, puesto que controla, por ejemplo, las formas químicas del azufre ( $S^{2-}$ ,  $S^0$ ,  $S^{4+}$ ,  $S^{6+}$ ). En el caso del uranio, interviene en la formación de depósitos tipo *roll front*, donde el uranio precipita al pasar de una zona oxidante, donde migra como  $U^{6+}$ , a otra reductora, donde precipita como  $U^{4+}$  en forma de  $UO_2$ . Este potencial determina igualmente la posibilidad de formación de depósitos de combustibles fósiles (carbón, petróleo, etc.), los que solamente se forman bajo condiciones reductoras. Las bacterias de tipo anaeróbico, cuyo desarrollo se favorece en presencia de grandes concentraciones de materia orgánica poco oxigenada, contribuyen al desarrollo y preservación de ambientes reductores.

ELECTRUM: Amalgama natural, constituida principalmente por oro y plata. Es común en los granos de oro presentes en placeres aluviales.

ELUVIAL: Se denominan así aquellos yacimientos, generalmente detríticos, que deben la concentración de sus minerales económicos a la erosión de constituyentes estériles del depósito original. Por ejemplo, así se forman los yacimientos de cromita (óxido de Fe y Cr), cuando los silicatos de las rocas ultramáficas son meteorizados y erosionados.

EMPÍRICO: En general se denomina así al conocimiento que es principalmente fruto de la experiencia directa. Se denomina modelos metalogénicos empíricos a aquellos de

carácter descriptivo, en oposición a los modelos metalogénicos conceptuales. En la formulación de estos últimos tiene un papel importante la proposición de los procesos de formación de los yacimientos, así como la estimación cuantitativa de las principales variables fisicoquímicas. Ver además: modelos metalogénicos.

**ENARGITA:** Mineral de cobre de fórmula  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ , de color gris a negro y brillo metálico, perteneciente al sistema ortorrómbico. Es abundante en las etapas tardías o en los niveles superiores de los pórfidos cupríferos, así como en algunos yacimientos epitermales de Au-Cu, como El Indio en Chile o Rodalquilar en España. En Chile es especialmente abundante en los pórfidos cupríferos de Chuquicamata, MM (actual A. Hales) y El Teniente. Por su contenido de As, la enargita implica serios problemas ambientales, especialmente en términos de las emisiones de  $\text{As}_2\text{O}_3$  por las chimeneas de las fundiciones, así como al posterior almacenamiento del  $\text{As}_2\text{O}_3$  recuperado. Tampoco se ha encontrado un procedimiento económico de biolixiviación que permita substituir su tratamiento pirometalúrgico. Las emisiones de  $\text{As}_2\text{O}_3$  revisten gravedad debido a que el As es un tóxico acumulativo y cancerígeno. En el norte de Chile, este problema se une a las concentraciones naturales altas de As que presentan algunos ríos y aguas subterráneas.

**ENDÓGENO:** El término significa generado internamente. En geología económica se denomina minerales endógenos y yacimientos endógenos a aquellos relacionados directa o indirectamente con procesos ígneos y metamórficos. El término se opone al de exógeno. Ver además: exógeno.

**ENDOSKARN:** En un yacimiento tipo skarn alude a aquella mineralización presente en el cuerpo intrusivo, en su zona de contacto con la roca encajadora. Ver además: skarn.

**ENERGÍA LIBRE:** Es un concepto termodinámico que mide la energía efectivamente asociada a una reacción química. Su valor corresponde al del calor generado (reacciones exotérmicas) o absorbido (reacciones endotérmicas), menos la energía perdida por efecto de la entropía:  $\Delta F = \Delta H - T\Delta S$ . Si  $\Delta F$  es negativo, la reacción debería ocurrir espontáneamente y generar calor. Si es positivo, no es espontánea y requiere calor para producirse. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la termodinámica nos indica cuales deben ser los estados de equilibrio, pero no la velocidad con la que estos se alcanzan (tema de la cinética química). Por lo tanto, una reacción espontánea de acuerdo a los parámetros termodinámicos puede ocurrir a una velocidad muy lenta y ser prácticamente imperceptible.

**ENRIQUECIMIENTO SUPÉRGENO (SUPERGÉNICO):** En inglés: *supergene enrichment*). El término alude a todo enriquecimiento de la concentración de minerales económicos (y por lo tanto de la ley) de un yacimiento, debido a los procesos de meteorización y erosión. También se le denomina enriquecimiento secundario. Puede ocurrir por efecto de la remoción de constituyentes estériles, lo cual incrementa la concentración de aquellos económicamente valiosos. Sin embargo, el término se refiere principalmente al proceso de enriquecimiento que ocurre en yacimientos de cobre y de plata, y que implica la oxidación de los minerales sulfurados presentes sobre el nivel freático. El metal liberado, mantenido en solución por efecto del ambiente ácido generado por la oxidación de pirita, desciende hasta más abajo del nivel freático y reacciona con los sulfuros primarios de los cuales desplaza los elementos menos valiosos. Así se forma, en el caso del cobre, el mineral calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), a expensas de bornita, calcopirita o pirita. En el caso de la plata, se forma argentita a partir de minerales como blenda (= esfalerita) ( $\text{ZnS}$ ). Sin embargo, no todos los enriquecimientos de minerales sulfurados son de carácter supérgeno (en España: supergénico). También puede desarrollarse en la etapa hidrotermal o por efecto de procesos análogos posteriores. Recientemente, R. Sillitoe ha planteado la posibilidad de que el enriquecimiento de plata en Chañarcillo, considerado un ejemplo clásico, sea hipógeno (hipogénico) y no supérgeno (supergénico). Lo que está fuera de discusión es la gran importancia económica que ha tenido el enriquecimiento supérgeno en yacimientos como La Escondida y Chuquibambilla. En este último, aparte de la zona de sulfuros enriquecidos se formó otra de óxidos ricos en cobre al bajar el nivel freático y oxidarse los sulfuros previamente enriquecidos. Factores favorables al enriquecimiento supérgeno (o secundario) de yacimientos cupríferos son un clima semiárido (vale decir, con lluvias estacionales moderadas), adecuada fracturación, tectónica de ascenso de bloques a una tasa también moderada, y suficiente presencia de pirita.

**ENTROPÍA:** Es un concepto termodinámico fundamental, que tiene diferentes connotaciones e implicaciones. En primer término se refiere a la energía que no es posible utilizar en un proceso y que por ello se considera degradada. Por ejemplo, una máquina térmica necesita entregar parte del calor generado al medio externo, lo que limita su rendimiento (Principio de Carnot). También la entropía debe ser sustraída a la energía libre de una reacción para evaluar su estado de equilibrio termodinámico. Otra connotación de entropía se refiere al estado de orden-desorden y de probabilidad-improbabilidad de un sistema. Con el incremento de entropía, los sistemas evolucionan de estados de orden (menos probables) a otros desordenados (más probables). Si bien esto no ocurre en los seres vivos, se debe a que el estado de orden se conserva mediante la extracción de energía del medio, de manera que la entropía total aumenta de todas maneras. El concepto de muerte térmica del Universo alude a un estado final en

que toda la energía disponible será de carácter térmico y estará distribuida de manera homogénea. Los procesos de contaminación ambiental así como los de dispersión geoquímica pueden ser analizados como procesos de crecimiento de entropía.

**EPIGENÉTICO** (en inglés: *epigenetic*): Se dice que un yacimiento es epigenético respecto a su roca encajadora (en inglés: *host rock*) si la roca encajadora se formó bastante tiempo antes que ocurriera su mineralización. El término se contrapone a diagenético y a singenético (ver definición de ambos).

**EPITERMAL** (en inglés: *epithermal*): El término se refiere a aquellos yacimientos hidrotermales formados a baja temperatura (200°-50°C; según Lindgren) y a relativamente poca profundidad. Sin embargo, no existe una relación estricta entre profundidad y temperatura en el interior de la Tierra, lo que puede complicar la aplicación de la segunda condición señalada. Por otra parte, en el caso de yacimientos de gran extensión vertical, como los pórfidos cupríferos, el depósito puede incluir una zona epitermal (la envolvente argílica del pórfido) una mesotermal (300°- 200°C, la zona filica del pórfido) y una hipotermal (500°-300°C, la zona potásica del depósito). Otros autores amplían el rango de temperatura epitermal a los 300°C. La mayoría de los depósitos de oro y de plata son epitermales (tipos Carlin, Bonanza, Hot Spring), aunque también existen depósitos auríferos de mayor temperatura, como los del tipo Bendigo, emplazados en estructuras de rocas plegadas antiguas.

**ÉPOCAS METALOGÉNICAS**: En un orógeno (como la cadena Andina) o en un escudo (como el escudo Brasileiro) se distinguen determinados intervalos de tiempo durante los cuales se formaron yacimientos de ciertos metales. Esos intervalos, según su duración, se denominan épocas (mayor duración) o pulsos (= episodios) metalogénicos (menor duración). Por ejemplo, la mayoría de los pórfidos cupríferos de Argentina, Chile y Perú se formaron entre fines del Cretácico y fines del Terciario, lo cual podría representar una época metalogénica, dentro de la cual hay tres pulsos principales, uno Cretácico tardío (norte de Chile, sur de Perú); otro Eoceno-Oligoceno (norte de Chile) y un tercero Terciario Superior (Chile central y Argentina). Otra época metalogénica importante es la del Carbonífero Inferior en el sur de España-Portugal, que dio lugar a la formación de yacimientos volcanogénicos exhalativos de Cu: la Faja Pirítica Ibérica. Yacimientos de esta provincia metalogénica son entre otros Rio Tinto, Aznalcollar, y Neves-Corvo.

**ESCOMBRERAS**: Ver desmontes.

**ESCUDOS**: Se denomina así a dominios lito-estructurales corticales de dimensiones continentales. Aunque sus terrenos experimentaron procesos orogénicos en el pasado,

los escudos se han comportado como bloques tectónicos estables desde fines del Precámbrico hasta la actualidad. Mineralizaciones típicas de los escudos son las chimeneas diamantíferas, los grandes cuerpos máficos lopolíticos con Cr-Ni y platinoides, las carbonatitas con tierras raras, yacimientos ferríferos tipo BIF, etc. Ello no excluye, sin embargo, que los escudos no puedan presentar mineralizaciones propias de las fajas orogénicas (como pórfidos cupríferos) pero generalmente ellas han sido metamorfizadas o removilizadas.

**ESMECTITAS:** Arcillas del tipo montmorillonita, en las que dos grupos tetraédricos Si-O rodean a un grupo octaédrico Al-O, repitiéndose indefinidamente esta estructura. Ello implica que dos capas tetraédricas quedan en contacto, generando un enlace débil. En esa posición se producen cambio de bases (por ejemplo de H<sup>+</sup> por Me<sup>+</sup> o Me<sup>2+</sup>). En la mina Radomiro Tomic (RT; distrito Chuquicamata, norte de Chile), se ha encontrado una esmectita rica en Cu. Aparte de este fenómeno, que puede dificultar la lixiviación en pilas de minerales de cobre, se agrega la incorporación de H<sub>2</sub>O, que genera una expansión del volumen de la arcilla, lo cual también es causa de problemas (suelos expansivos). Ver además: arcillas.

**ESPECULARITA:** Hematita (= hematites) brillante, con estructura hojosa tipo mica. Acompaña a distintos tipos de mineralizaciones. Su color en agregados cristalinos mayores es negro, pero al disgregarse finamente se manifiesta el color rojo sangre del mineral.

**ESQUISTOS BITUMINOSOS** (en inglés: *oil shales*): Se trata de rocas pelíticas (clásticas de grano fino) notablemente enriquecidas en hidrocarburos (varias decenas de %). A diferencia del caso del petróleo, donde la fracción orgánica migró hasta llegar a la roca almacenadora, en estos depósitos permaneció en la roca madre. Los yacimientos de hidrocarburos de este tipo encierran enormes reservas, pero su explotación ha permanecido puntual debido a razones económicas y ambientales (en Lonquimay, Región del Bío Bío, Chile, llegaron a explotarse a escala reducida a fines de los años 1930's). Su explotación puede realizarse mediante dos procedimientos. El primero implica la extracción de la roca mediante minería convencional, seguida por su molienda y posterior destilación. Esto implica la necesidad de disponer y estabilizar el material clástico residual, lo cual es difícil y costoso. El segundo consiste en su destilación *in situ*, que se realiza después de preparar la mina y quemar (controlando la cantidad de aire) parte del material, facilitando el escurrimiento hacia la superficie del material fundido no afectado. Es un método complejo, que implica riesgos y obliga a sacrificar una parte importante de las reservas. Pese a las dificultades señaladas, la explotación de estos depósitos estuvo a punto de iniciarse en USA en los años 1970's, aprovechando sus

grandes reservas, en particular las situadas en el Estado de Colorado. Esto por fin no sucedió debido a que los precios del petróleo bajaron (después del alza asociada a la crisis iraní). En todo caso, considerando la explotación en curso de las arenas alquitranadas de Alberta (Canadá), es previsible que su aprovechamiento se realice en un mediano plazo. Ver además: arenas alquitranadas.

**ESTÉRIL** (en inglés: *barren*): Material que no contiene concentraciones económicas ni sub-económicas de los metales que son objeto de la explotación (aunque podrían tener un valor posterior, por ejemplo, por un mineral de ganga recuperable). Ver desmontes (= escombreras).

**ESTRATIFORME** (en inglés: *stratiform*): Cuerpo mineralizado concordante, cuya morfología sigue la forma de las capas de una secuencia estratificada.

**ESTRATOLIGADO** (en inglés: *stratabound*): Mineralización cuya distribución está ligada a determinados estratos de una secuencia volcánica o sedimentaria. Esta mineralización puede ser o no estratiforme. Ver además: estratiforme.

**ESTRATOVOLCÁN**: Volcán compuesto de estratos alternados de lavas y de material piroclástico. Es una forma típica del volcanismo calcoalcalino, caracterizada por variaciones del contenido de sílice del magma en torno a una composición intermedia. Al aumentar ligeramente el contenido en sílice se producen episodios explosivos con emisión de piroclastos (aumento de viscosidad). Al disminuir los contenidos en sílice los episodios son más tranquilos dando lugar a la emisión de lavas fluidas, produciéndose así una alternancia de lavas y piroclastos. Este es el tipo de volcán más abundante en la Cadena Andina y en arcos de islas. Implica peligros importantes por su explosividad, pero sus cenizas aportan nutrientes para los suelos hasta grandes distancias, y en sus niveles sub-volcánicos puede estar asociado a valiosos tipos de mineralización. Ver además: magmatismo calcoalcalino.

**ESTRUCTURAS** (en inglés: *structures*): Se refiere a rasgos morfológicos asociados al proceso de formación de una roca o un macizo rocoso (p.ej., de un volcán, una colada de lava, un estrato sedimentario, un batolito) o al posterior efecto de procesos tectónicos deformativos (plegamiento, diaclasamiento, fallamiento, metamorfismo dinámico). Las estructuras, junto a la litología, ejercen un control principal en la distribución de las mineralizaciones a sus distintas escalas.

**EUTÉCTICO:** Mezcla de dos o más componentes cuyo punto de fusión es inferior al de cualquiera de ellos considerado separadamente. Las pegmatitas poseen la composición aproximada del eutéctico ternario: ortoclasa-albita-cuarzo.

**EVAPORITAS** (en inglés: *evaporites*): Yacimientos de minerales salinos, formados por la saturación de las soluciones debida al proceso de evaporación en cuencas de regiones áridas o hiperáridas. En ellos se encuentran sales muy solubles, como cloruros y sulfatos de Na, Mg y Ca. Los yacimientos de nitratos del norte de Chile representan un caso especial de depósito evaporítico. Otro ejemplo notable son los yesos del Mioceno de la Cuenca de Sorbas en el sureste de España.

**EXHALATIVO:** Yacimiento formado por emanaciones de origen volcánico. Las acumulaciones de sulfuros polimetálicos descubiertos en las dorsales oceánicas, asociadas a las fuentes de emisiones de sulfuros en forma de chimeneas (*black smokers*) son propiamente yacimientos exhalativos.

**EXÓGENO:** Proceso o depósito que tiene su origen en la superficie de la Tierra, ligado a fenómenos climáticos e hidrológicos que controlan la meteorización y la erosión de las rocas. Corresponde al concepto de supérgeno (= supergénico). Por ejemplo, el enriquecimiento supérgeno, es un proceso exógeno particular, como lo son los procesos exógenos generales de meteorización, remoción en masa y erosión. Yacimientos como los de placeres aluviales, los depósitos exóticos de cobre y las evaporitas de los salares son de origen exógeno.

**EXOSKARN:** Parte principal de un yacimiento de tipo skarn, correspondiente a la mineralización depositada en la roca estratificada afectada por el metamorfismo de contacto y el metasomatismo pneumatolítico-hidrotermal producido por el cuerpo intrusivo.

**EXÓTICO** (en inglés: *exotic*): El término designa un yacimiento exógeno originado por la erosión y transporte (mecánico y/o químico) de parte de un depósito preexistente. Se aplica básicamente a yacimientos de minerales oxidados de cobre depositados por efecto del drenaje ácido subterráneo procedente de la oxidación de un pórfido cuprífero situado en una posición topográfica más alta, a unos pocos km de distancia. En algunos casos como en el del yacimiento Mina Sur (ex Exótica) situado al sur de Chuquicamata, se conoce perfectamente el paleocanal que utilizaron las soluciones ácidas con cobre. A medida que la solución avanza, su reacción con las rocas y sedimentos genera un efecto de alteración sobre estas mientras la solución gradualmente se va neutralizando. Así se libera SiO<sub>2</sub>, Mn<sup>2+</sup> (que se oxida a MnO<sub>2</sub>) y otras sustancias y elementos de las rocas, que junto con iones presentes en la solución transportadora, dan lugar a la precipitación

de minerales de cobre. Los principales minerales son crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), atacamita (oxicloruro de Cu), Cu-Wad ( $\text{MnO}_2$  rico en Cu), Cu-pitch (óxidos de Cu con  $\text{MnO}_2$ ), etc. Aunque el carácter oxidado de los minerales de Cu ofrece algunas ventajas metalúrgicas, la presencia de minerales de arcilla y  $\text{MnO}_2$  puede dificultar su lixiviación obligando a pre-tratar la mena. La presencia de estos yacimientos es muy probable en el entorno de pórfidos cupríferos meteorizados bajo condiciones de clima semiárido y en situación topográfica positiva respecto a las rocas y sedimentos de sus alrededores.

**EXPLORACIÓN MINERA** (en inglés: *mining exploration, mineral exploration*): El término designa diversas actividades y etapas de trabajo destinadas al descubrimiento, evaluación y estimación de recursos y reservas de minerales de interés económico. Va desde una etapa inicial de detección de posibles prospectos, vale decir, áreas de interés para la realización de estudios ulteriores, hasta campañas de sondajes (= sondeos) destinados a la estimación de reservas. La exploración minera puede ser centrífuga, vale decir, partir de un depósito conocido hacia su entorno geológico en búsqueda de nuevas reservas o nuevos yacimientos (en Chile: caso del descubrimiento de El Salvador desde Potrerillos o el de Candelaria, desde un yacimiento menor del distrito Punta del Cobre). También puede ser centrípeta, vale decir, partir de una gran superficie para localizar uno o más yacimientos en su interior (en Chile: caso del descubrimiento de La Escondida). Puede ser realizada para encontrar prospectos o yacimientos para ser vendidos a otras empresas (caso de las compañías *junior* canadienses), o bien para reponer o expandir reservas de la misma empresa que explora y explota yacimientos. La exploración minera utiliza conocimientos, criterios, métodos y tecnologías de carácter geológico, mineralógico, geoquímico y geofísico, además de variados tipos de sensores remotos. Sin embargo, la experiencia de terreno, la imaginación, tenacidad y disposición al riesgo de los geólogos es esencial en el logro de éxitos. En suma, la exploración minera sigue siendo un arte (y en parte una aventura) pese a la ciencia y tecnología que la apoyan. El término prospección minera se utiliza a veces como sinónimo de exploración minera, y otras para designar solamente sus primeras etapas.

**EXTRANJERO**: Término utilizado para indicar que la mineralización que alberga un yacimiento tiene una fuente diferente del material del que proceden sus rocas encajadoras. Se opone al término familiar. El término fue propuesto originalmente por G. C. Amstutz y modificado por P. Routhier.

## F

**FACIES:** Término que denota tanto el singular como el plural (la facies, las facies). Indica rasgos distintivos de una unidad sedimentaria, de rocas ígneas, o metamórficas. Por ejemplo: facies carbonatadas marinas fosilíferas, la facies metamórfica de esquistos azules (con jadeíta + glaucofano). Las características de la facies son indicativas de las condiciones específicas de formación de la roca. El concepto es muy útil en exploración minera de yacimientos emplazados en rocas sedimentarias así como en determinadas facies metamórficas (p.ej., en las zonas de contacto de intrusivos con rocas estratificadas pelítico-carbonatadas).

**FAMILIAR:** Designa una mineralización cuyo origen se atribuye a la misma fuente de la roca encajadora. Por ejemplo, en un pórfido cuprífero, la mineralización presente en el pórfido es familiar respecto a éste (puesto que proceden del mismo magma). Ver además: extranjero.

**FASE:** Concepto físico-químico que designa una porción homogénea de un sistema termodinámico. El número de grados de libertad ( $L$ ) de dicho sistema (vale decir, de las variables que es posible modificar sin alterar el estado de equilibrio de las fases del sistema) es igual al número de sus componentes ( $C$ ) menos el número de fases ( $F$ ) más dos, que se expresa de la siguiente manera:  $L = C - F + 2$  (regla de las fases de Gibbs). Este concepto se aplica en temas como la cristalización de los silicatos, el estudio de las soluciones hidrotermales, las inclusiones fluidas de los minerales, etc.

**FÉLSICO:** Se dice de los magmas o las rocas ígneas cuya composición es rica en feldespatos y en sílice, por ejemplo, un magma riolítico o una granodiorita. Se opone al término máfico. El término felsita se utiliza para designar en general a rocas félsicas. El término *félsico* es equivalente al de *ácido* (p.ej., un granito es una roca ácida).

**FILÓN (VETA)** (en inglés *lode*, *vein*): El término se utiliza para designar a cuerpos emplazados en planos de falla. En cierto grado es análogo al de veta. Sin embargo, el concepto de filón es más amplio, y se puede aplicar a masas mineralizadas más irregulares y menos definidas que una veta, por ejemplo, el *Mother Lode* (Filón Madre) al que se asociaban numerosas mineralizaciones auríferas en California. En España filón denota un cuerpo mineralizado tabular emplazado a lo largo de una falla u otro accidente estructural.

**FISURA:** Fractura.

**FLOTACIÓN** (en inglés: *flotation*, menos común: *floatation*): En general el término designa cualquier proceso de concentración o purificación de un mineral (en sentido amplio) que se realiza aprovechando su menor densidad o bien su capacidad para adherirse a una burbuja de aire. El primer caso corresponde, por ejemplo, a la flotación de carbón mineral para eliminar algunas impurezas. El segundo procedimiento es de gran uso en el tratamiento de minerales sulfurados. Consiste en la molienda fina de la mena, seguida de la separación de los sulfuros de la ganga mediante la adherencia de los primeros a burbujas de aire, lograda con la ayuda de sustancias surfactantes (espumantes y colectores). En España se ha utilizado históricamente el término lavado para el proceso y lavadero, para la planta de flotación. Modificando otros parámetros como el pH, es posible obtener la depresión de algunos sulfuros como pirita, logrando así concentrados de mejor ley y menor contenido de impurezas. La flotación puede ser realizada en celdas rectangulares o cilíndricas de variado tamaño, así como en columnas (flotación columnar).

**FLUIDO**: El término se aplica a sustancias líquidas o gaseosas, cuya baja coherencia intermolecular permite su flujo. Los fluidos desempeñan un papel esencial en la segregación y transporte de los metales en las etapas pegmatítica, neumatolítica e hidrotermal que siguen a la cristalización de los magmas. También son esenciales en la formación de yacimientos de origen sedimentario y metamórfico.

**FORMAS (MORFOLOGÍA)** (de los yacimientos minerales): Bajo el punto de vista de la forma (morfología) los yacimientos minerales se pueden clasificar en uni, bi y triextendidos. En los uniextendidos (= morfología tubular discordante) se encuentran los yacimientos tipo chimenea de brecha de pequeño diámetro y gran extensión vertical, así como las intersecciones de dos vetas (clavos de bonanza). Los biextendidos son propios de las vetas (= morfología tabular discordante) y de los depósitos estratiformes (= morfología concordante), mientras que los triextendidos (= morfología irregular discordante) incluyen los pórfidos cupríferos. En un yacimiento puede haber combinaciones de formas, por ejemplo, un *stockwork* triextendido (= morfología irregular discordante) con una chimenea de brecha uniextendida (= morfología tubular).

**FRACTURA** (en inglés: *fracture*): El término incluye tanto a las diaclasas como a las fallas. En el primer caso los planos de ruptura implican una simple apertura de la roca, sin desplazamiento relativo paralelo a dichos planos, mientras que en las fallas existe desplazamiento relativo. Ambos fenómenos implican una conducta frágil de la roca (rotura). Tanto los planos de diaclasas como los de fallas pueden albergar mineralizaciones hidrotermales, aunque las mineralizaciones de mayor magnitud se desarrollan en planos de falla por la mayor extensión que estos alcanzan. También es

común que los planos de falla corten y desplacen masas mineralizadas preexistentes, lo que puede facilitar la erosión de aquellas situadas en el bloque ascendente.

**FREÁTICO:** Se denomina nivel freático a aquel situado en una roca o sedimento que separa el acuífero saturado de la zona vadosa superior no saturada. Bajo el nivel freático, todos los poros y fracturas interconectadas están saturados de agua. Sobre el nivel freático puede haber agua subterránea en descenso, pero parte de los espacios contienen aire. Como consecuencia de ello, la zona de oxidación de los yacimientos sulfurados se desarrolla sobre el nivel freático (zona rica en oxígeno) y en cambio, la de cementación o formación de sulfuros enriquecidos se sitúa bajo él (zona pobre en oxígeno). Cuando una explotación minera corta el nivel freático, puede ser necesario bombear el agua que ingresa a las labores subterráneas o superficiales. Por otra parte, la posición del nivel freático al término de una explotación minera es un factor muy importante a considerar en el plan de cierre.

**FREATOMAGMÁTICA:** Designa un tipo de erupción (*maar*) así como a sus productos, por ejemplo, la brecha generada en condiciones explosivas debido a la interacción del magma con las aguas subterráneas.

**FUENTE TERMAL** (en inglés: *hot spring*): Es un afloramiento de aguas subterráneas calientes. Generalmente se encuentran en zonas de alto gradiente geotérmico, producto de la presencia de cuerpos magmáticos en curso de enfriamiento o de una corteza continental adelgazada por un proceso extensional de *rifting*. Su interés práctico se relaciona con la posible presencia de sistemas geotérmicos explotables (para energía geotérmica), de mineralizaciones hidrotermales o, caso más común, de su aprovechamiento médico-recreacional (termas). Con respecto a esto último, resulta curioso que la gente acuda de manera masiva y pagando para beber aguas que en otras condiciones serían consideradas no aptas para el consumo por su elevado contenido en metales pesados y metaloides.

**FUGACIDAD:** Parámetro termodinámico correspondiente a la presión parcial corregida de un gas (de manera de acercar los cálculos al comportamiento de un gas ideal). La fugacidad es un parámetro importante en el estudio de sistemas mineralizadores neumatolíticos. Tres parámetros importantes en dichos estudios son: la fugacidad de azufre, la del oxígeno y la del cloro.

**FUMAROLA:** Punto de la superficie terrestre del cual escapan gases a alta temperatura, el que puede estar bajo aire o bajo agua. Las fumarolas son comunes en áreas

volcánicas y a ellas se asocia la formación de depósitos de azufre nativo, por reacción de anhídrido sulfuroso con ácido sulfhídrico:  $\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow 3\text{S}^0 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

**FUNDENTE:** Sustancia que tiene la propiedad de disminuir el punto de fusión de otras, facilitando dicho proceso o retardando su cristalización. Por ejemplo, el agua actúa como un fundente respecto a rocas y magmas silicatados, debido a su efecto despolimerizante. De ahí que el mayor contenido de agua favorezca el emplazamiento más cercano a la superficie de los magmas ricos en sílice (cuya viscosidad dificulta en principio su ascenso).

## G

**GABRO:** Roca ígnea máfica plutónica constituida por plagioclasa cálcica, piroxeno y olivino (= olivina), vale decir, similar a un basalto (su equivalente volcánico) en términos composicionales. Los gabros están asociados a mineralizaciones de elementos siderófilos, como cromo, níquel y platinoides.

**GALERÍA** (en inglés: *drift* y si es de acceso: *adit*): En minería subterránea corresponde a un túnel, esto es, se trata de una labor horizontal. Se complementa con los piques (en inglés: *shaft* o *raise*) (= pozos) y con labores inclinadas (*inclined shafts*). Estas labores permiten el acceso a la mina, y a los cuerpos mineralizados, así como su ventilación y la extracción de los minerales explotados.

**GANGA** (en inglés: *gangue*): Minerales constituyentes de la mineralización de un yacimiento que no tienen interés económico para quienes explotan el yacimiento. Generalmente el término se utiliza para silicatos o minerales no metálicos, como la calcita. Los minerales de ganga de una explotación pueden llegar a adquirir valor económico, por ejemplo, la baritina (= barita) de una explotación de plata. Esto depende del precio que alcancen, de la existencia de un poder de compra local, de las inversiones requeridas para su concentración, etc. En situación intermedia se encuentran los minerales integrantes de la mena, que pueden o no ser recuperados. Por ejemplo, recientemente se inició la concentración de magnetita en el yacimiento cuprífero de Candelaria (Copiapó, Chile), mineral que antes no era aprovechado económicamente. Esto se facilita porque el proceso de molienda (etapa intensiva en costos) debe realizarse de todas maneras para separar el mineral principal. En todo caso, siempre que se explote un yacimiento debería considerarse en su totalidad mineralógica y separar los

desechos sólidos del proceso con vistas a posibles recuperaciones futuras de subproductos. Ver además: mena.

**GEOESTADÍSTICA** (en inglés: *geostatistics*): Los métodos tradicionales de evaluación de reservas de yacimiento asumen un carácter isótropo de la distribución de sus leyes. En consecuencia estiman la ley de los puntos no muestreados sobre la base de sus distancias a aquellos de ley conocida por haber sido muestreados y analizados. Para esto se utilizan los criterios de los inversos de las distancias (ID) o de los inversos de los cuadrados de las distancias (ID<sup>2</sup>). Esto implica que la validez de la estimación disminuye con la distancia o el cuadrado de esta. Alternativamente, las leyes pueden ser estimadas por áreas de confianza. Así, en una sección podemos extrapolar las leyes medias de un sondeo (= sondaje) hasta la distancia media que existe entre este y el sondeo siguiente. En cambio la geoestadística (ciencia fundada por el matemático francés G. Matheron) considera no solo la posición de los puntos conocidos en el espacio sino que además, la isotropía-anisotropía de los datos mediante el estudio de la función  $\gamma(h)$ , esto es, el variograma:  $\gamma(h) = \frac{1}{2} n \sum [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$ , donde  $h$  es la distancia entre las muestras,  $X_i$  es la posición de cada muestra,  $Z$  es el valor de la muestra en el punto  $X_i$  y  $n$  el número de pares considerados. A partir de esta función, se puede estudiar el sistema en términos de la variación espacial, determinando el *alcance* (distancia máxima de confiabilidad) en función de la anisotropía de los datos. Así, puede que los datos presenten una mayor continuidad N-S que E-W (el *alcance* sería mayor en el primer caso). Una vez establecido el modelo de variograma (modelización espacial de la anisotropía del sistema) se puede interpolar los datos espacialmente mediante la técnica de *kriging*. En otras palabras, el *kriging* incorpora la anisotropía determinada por el variograma posibilitando una estimación espacial mucho más confiable. Por otra parte el *kriging* permite conocer *a priori* la varianza de los errores que se cometerán en la estimación. Según el cuerpo mineralizado presente límites difusos o bien límites geológicos netos, se utiliza el *kriging* convencional o bien *kriging* bajo restricción geológica.

**GEOFÍSICA** (en inglés: *geophysics*): En exploración minera se utiliza una amplia gama de métodos geofísicos. En términos básicos, se trata de conocer la expresión o la respuesta de las rocas no expuestas y los posibles yacimientos asociados a ellas en términos de sus propiedades físicas. Estas propiedades incluyen: a) densidad (en términos de masa gravitacional), b) magnetismo, c) reflexión y refracción de ondas sísmicas, d) conductividad eléctrica, e) respuesta a ondas electromagnéticas, f) conductividad térmica, etc. Algunos métodos geofísicos, como gravimetría, magnetometría, etc. implican simplemente realizar mediciones. En otros casos, como la sísmica, conductividad eléctrica, etc. es necesario producir un efecto (p.ej., una

explosión, la generación de corrientes eléctricas, ondas electromagnéticas, etc.) para registrar la correspondiente respuesta. Los métodos basados en radioactividad son un tipo especial de métodos de exploración, situados a medio camino entre la geofísica y la geoquímica (puesto que permiten detectar indirectamente los isótopos radioactivos presentes). Realizadas las mediciones y su corrección, así como el proceso matemático de la información, se elabora un modelo geofísico que explica la anomalía detectada (lo cual puede ser realizado por varios modelos alternativos). Dicho modelo se utiliza en conjunto con el resto de la información modelizada (geológica, geoquímica, mineralógica, etc.) para seleccionar los blancos de sondajes (= sondeos), o bien detener por el momento la exploración, o descartar el área estudiada si los resultados son negativos. La geofísica es una herramienta de apoyo, y no una técnica definitiva. Esto quedó comprobado durante la exploración del yacimiento de Neves Corvo (Portugal), donde sin la modelización tectónica habría sido imposible orientar adecuadamente los sondajes (= sondeos) por los datos gravimétricos, como se comprobó después de algunos errores preliminares.

**GEOQUÍMICA** (en inglés *geochemistry*): La geoquímica es la ciencia que estudia la distribución de los elementos químicos en la Tierra y en otros planetas, y elabora las leyes que describen dicha distribución y las hipótesis que la explican. Puesto que los yacimientos minerales constituyen concentraciones anómalas de elementos minerales o sustancias (como el carbón o el petróleo), la detección de las anomalías superficiales de estos permite la detección de yacimientos profundos ocultos o bien de depósitos superficiales situados a cierta distancia de las muestras analizadas. El segundo caso corresponde, por ejemplo, al de un yacimiento que aflora en el área de nacimiento de un río, cuyos contenidos metálicos contaminan sus aguas y sedimentos y permiten por lo tanto su detección a distancia. Los métodos geoquímicos de exploración minera se clasifican según el material muestreado y su origen. Tenemos así a) geoquímica de rocas, b) geoquímica de suelos, c) geoquímica de aguas y sedimentos (de la red de drenaje, de lagos, etc.), y d) biogeoquímica (normalmente de plantas). Un método asociado, que no es propiamente geoquímico es la geobotánica, basado en la observación de cambios de color o morfología en las plantas, que pueden ser interpretados en términos de altas concentraciones de metales o metaloides en los suelos. Los notables avances en las técnicas analíticas instrumentales para metales y metaloides permiten hoy trabajar con análisis de decenas de elementos químicos en cada muestra a costos (= costes) muy bajos. La exploración (= prospección) geoquímica ha sido notablemente efectiva en el descubrimiento de nuevos yacimientos y es utilizada en todo tipo de exploraciones mineras. También tiene aplicaciones importantes en la exploración de hidrocarburos. Por otra parte, similares criterios y procedimientos son utilizados por la geoquímica ambiental, que investiga concentraciones anormales de

elementos o sustancias que pueden tener efectos tóxicos, ya sea debidas a procesos naturales o a actividades humanas (mineras, industriales, agrícolas etc).

**GEOTECNIA** (en inglés: *geotechnics*): La geotecnia es una disciplina profesional dedicada a las aplicaciones ingenieriles de la geología, la geomecánica y la hidrogeología. Por ejemplo, al planificar la construcción de un túnel que atraviesa una montaña, se parte con: a) un modelo geológico que describe las rocas presentes y sus estructuras, b) un modelo hidrogeológico que muestra el comportamiento del agua subterránea y c) un modelo geomecánico. Este último describe los parámetros físicos de las rocas presentes y su conducta frente a la activación de sus estructuras por los cambios de magnitud y dirección de los esfuerzos que implica la obra de ingeniería a realizar. Corresponde a la geotecnia utilizar esta información en la elaboración de un modelo predictivo, tanto del comportamiento del macizo rocoso y sus aguas subterráneas durante la excavación del túnel, como de la situación del sistema una vez completada la obra.

**GEOTERMOMETRÍA:** El término se refiere a la determinación de la temperatura de formación de minerales, ya sea mediante el estudio de inclusiones fluidas, del grado de algunos reemplazos diadócicos (por ejemplo, el contenido de Fe en esfalerita es directamente proporcional a su temperatura de formación) o de la presencia de estructuras de desmezclas de minerales (cuya presencia permite fijar temperaturas mínimas de formación). Las inclusiones fluidas representan una muestra de las soluciones hidrotermales a partir de las cuales se formaron los minerales. En consecuencia, en el caso de inclusiones fluidas que incluyen dos o más fases, la temperatura a la cual se homogenizan es indicativa de su temperatura de formación.

**GOSSAN:** Se denomina así a la cubierta oxidada y lixiviada desarrollada sobre un yacimiento sulfurado aflorante meteorizado. El estudio de los minerales oxidados de hierro presentes (goethita, hematita, jarosita) así como el de las celdillas residuales dejadas por la oxidación de los minerales sulfurados, constituyen criterios diagnósticos valiosos en la evaluación preliminar del yacimiento subyacente. Ver además: celdillas residuales.

**GRANATES** (en inglés: *garnet*): Son nesosilicatos, cuya fórmula general es:  $Me_3^{2+} Me_2^{3+} Si_3 O_{12}$ , donde  $Me^{2+}$  puede ser Ca, Mn,  $Fe^{2+}$  o Mg y  $Me^{3+}$  puede corresponder a Al o Fe. Según su catión  $Me^{2+}$ , se clasifican en granates cálcicos, de Mn, etc. Cristalizan en la clase hexaquisoctaédrica del sistema cúbico. Son minerales característicos del metamorfismo de contacto de secuencias pelíticas, carbonatadas y volcánicas y junto a piroxeno y anfíbolos (= anfíboles), son los minerales de ganga principales de los

yacimientos tipo skarn. En términos generales, los skarn de Cu y Mo están asociados a granates de  $\text{Ca}^{2+} \text{Fe}^{3+}$  (andradita). En dichos depósitos, la coloración del mineral puede indicar la proximidad al cuerpo intrusivo, al adquirir éste una coloración rojiza intensa. Aparte de su valor diagnóstico, los granates tienen valor como minerales industriales debido a sus propiedades abrasivas, recuperándose como minerales aluviales de depósitos tipo placer, formados por meteorización y erosión de rocas afectadas por metamorfismo de contacto.

**GRANITOIDE** (en inglés: *granitoid*): Término de uso general para designar rocas plutónicas de composición ácido-intermedia (como granodiorita, tonalita, monzonita, etc.).

**GRANODIORITA**: Roca ígnea plutónica formada por plagioclasa sodico-cálcica, feldespato potásico, hornblenda, biotita y cuarzo. Su equivalente volcánico es la dacita. La composición de los pórfidos cupríferos de la cadena andina es granodiorítica, a diferencia de la composición diorítico cuarcífera – andesítica de los pórfidos cupríferos de arcos de islas oceánicas.

**GREISSEN**: Tipo de alteración neumatolítica-hidrotermal típica de algunos yacimientos asociados a intrusiones graníticas como los de Sn-W. La mineralogía del greissen incluye muscovita (= moscovita), feldespato (de Na o K), cuarzo, topacio, turmalina y fluorita.

## H

**HALOGENUROS**: Minerales que incluyen un elemento del grupo 7A de los halógenos (F, Cl, Br, I). Por ejemplo, la querargirita ( $\text{AgCl}$ ) (= clorargirita) es un halogenuro.

**HETEROCRÓNICOS**: Término usado por P. Routhier para denominar a yacimientos de los mismos metales, pero de distinta edad presentes en un dominio metalogénico.

**HETEROTÍPICOS**: Yacimientos de los mismos metales principales, pero de distinta tipología presentes en un dominio metalogénico (P. Routhier).

**HERENCIA**: En metalogénesis se refiere a la hipótesis de que el contenido metálico de algunos yacimientos presentes en un dominio o provincia metalogénica pudo provenir de

otros depósitos más antiguos de los mismos metales principales, que enriquecieron niveles inferiores subyacentes del mismo dominio o provincia.

**HIDROCARBUROS** (en inglés: *hydrocarbons*): Son compuestos de carbono e hidrógeno que integran el gas natural, el petróleo, los esquistos bituminosos y las arenas alquitranadas. El tipo más común es el de la serie alifática, y tiene por fórmula general  $C_nH_{2n+2}$ . Los más livianos de la serie son gaseosos a presión atmosférica normal, como los constituyentes del gas natural ( $CH_4$  a  $C_3H_8$ : metano a propano) o del gas licuado ( $C_3H_8$  y  $C_4H_{10}$ : propano a butano), luego siguen los líquidos (como el octano  $C_8H_{18}$ , que define el octanaje de la bencina, y los hidrocarburos de las parafinas). Finalmente, los de mayor peso molecular son sólidos. La combustión de los hidrocarburos genera más energía por unidad de emisiones de  $CO_2$  que el carbón, debido a la contribución del H, cuya oxidación  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$  entrega energía adicional a la producida por la oxidación del carbono.

**HIDRÓLISIS**: El agua pura a  $25^\circ C$  se encuentra débilmente ionizada a través del siguiente equilibrio:  $H_2O = H^+ + OH^-$ , y el producto de equilibrio ( $K_w$ ) es  $[H^+][OH^-] = 10^{-14}$  moles/litro. Así  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$  (la concentración de hidrogeniones es igual a la de oxidrilos =  $10^{-7}$ ). Por esto el pH del agua pura es 7 ( $pH = -\log [H^+] = -\log (10^{-7}) = 7$ ). Etimológicamente la hidrólisis no es más que la descomposición de una sustancia por la acción del agua. El término proviene de un período antiguo de la química, en el que se pensaba que el agua podía dividir una sal en un ácido y una base, por ejemplo:  $CaCO_3 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2CO_3$ . La realidad es diferente, más compleja, y lo que muestra son equilibrios y reequilibrios a medida que el carbonato de calcio (ejemplo de arriba) reacciona con los hidrogeniones ( $H^+$ ) del agua:  $CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$  (a). La reacción implica un consumo de hidrogeniones, lo cual lleva a que se ionice más agua para mantener el equilibrio:  $H_2O = H^+ + OH^-$  (b). Si combinamos las reacciones (a) y (b) tendremos:  $CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + OH^- + HCO_3^-$ , la cual representa de manera más adecuada el proceso de hidrólisis, pudiéndose observar el carácter alcalino que adopta el sistema. La hidrólisis juega un papel principal en la destrucción de los feldespatos, tanto en procesos hidrotermales como supergénicos. Por ejemplo:  $3KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$  (paso de feldespato potásico a sericita) y  $2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 3H_2O \rightarrow 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+$  (paso de sericita a caolinita).

**HIDROMETALURGIA** (en inglés: *hydrometallurgy*): La hidrometalurgia incluye una amplia gama de tecnologías de procesos metalúrgicos, que tienen en común el hecho de que las reacciones se realizan en un medio acuoso. Aunque la mayoría de los procesos hidrometalúrgicos se realizan a temperatura ambiente y en espacios abiertos (ya sea estanques o pilas) también existen procesos en caliente, que se realizan en autoclaves.

Por otra parte, se ha considerado (y realizado en algunos casos) la hidrometalurgia *in situ* de depósitos oxidados y fracturados, recuperando las soluciones enriquecidas en metales mediante bombeo o túneles. Los procesos hidrometalúrgicos de mayor uso son los de lixiviación de minerales oxidados de cobre en medio ácido (ácido sulfúrico diluido), lo que conlleva la formación de sulfatos solubles de cobre ( $\text{CuSO}_4 = \text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ ). Por ejemplo:

- Crisocola:  $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
- Brochantita:  $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 4\text{CuSO}_4 + 6\text{H}_2\text{O}$
- Atacamita:  $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O}$

Además se realiza la lixiviación de oxidados y sulfuros ricos de cobre (calcosina, bornita, covelina = covellina) con apoyo bacterial (biolixiviación). También es muy importante la lixiviación cianurada de oro en medio alcalino, que reemplazó al nivel industrial el método tradicional de amalgamación mercurial del oro, por ejemplo:

- $2\text{Au}^0 + 4\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Au}[(\text{CN})_2]^{2-} + 2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}_2$

La hidrometalurgia ofrece importantes ventajas económicas y puede ser acompañada de la obtención directa del metal puro (en el caso del Cu, por extracción con solventes orgánicos seguida de electrolisis). Por otra parte, es menos exigente en materia de molienda que la flotación de sulfuros y evita la contaminación del aire que implica la posterior pirometalurgia de los minerales sulfurados concentrados. En cambio, implica algunos riesgos de contaminación, en particular de las aguas subterráneas. Las exigencias ambientales respecto a limitar las emisiones de  $\text{SO}_2$  de las fundiciones de sulfuros de cobre han llevado a su recuperación bajo la forma de ácido sulfúrico. En Chile, esto ha producido una beneficiosa sinergia, al generar grandes cantidades de ácido sulfúrico de bajo costo, las que han sido utilizadas en la hidrometalurgia del cobre.

HIDROSTÁTICA: Ver presión hidrostática.

HIDROTERMAL (en inglés: *hydrothermal*): El término se aplica a toda solución acuosa caliente de origen natural. Las soluciones hidrotermales pueden tener distintos orígenes, entre los principales: a) agua contenida en solución en un magma y liberada en el curso de su cristalización, b) agua contenida en sedimentos, que se separa en el curso de la diagénesis y litificación de la secuencia, c) agua liberada en el curso del metamorfismo de rocas, d) aguas subterráneas calentadas por efecto de un alto gradiente geotérmico debido a un cuerpo magmático en cristalización, al desarrollo de un rift, etc. Las soluciones hidrotermales salinas (*brines*) tienen un especial potencial para lixiviar

metales de las rocas, así como para transportarlos, debido a su capacidad para formar iones metálicos complejos con los aniones que contienen (p.ej. complejos clorurados). La etapa hidrotermal constituye la última fase de la cristalización de un magma, después de la cristalización principal, la etapa pegmatítica y la neumatolítica.

**HIPABISAL:** Nivel de cristalización de un cuerpo magmático comprendido entre el nivel plutónico o profundo, propio de un batolito (4-5 km) y el nivel subvolcánico, próximo a la superficie (menos de 2 km). A este nivel corresponde el emplazamiento de los pórfidos cupríferos (2-3 km).

**HIPÓGENO (HIPOGÉNICO):** El término indica el origen de un mineral o de una solución en el sentido de que proviene de la profundidad. Por ejemplo, un mineral depositado por una solución hidrotermal procedente de la cristalización de un cuerpo ígneo se considera hipógeno (al igual que la solución respectiva). El término se opone a supérgeno (= supergénico), proveniente de la superficie, por ejemplo, los minerales secundarios de la zona de cementación (= enriquecimiento) de sulfuros.

**HIPOTERMAL** (en inglés: *hypothermal*): En la clasificación de los yacimientos hidrotermales propuesta por Lindgren, denomina a aquellos formados a mayor temperatura, entre 500° y 300°C. En el proceso de cristalización de un magma, corresponde a aquellos formados por las soluciones hidrotermales tempranas, de mayor temperatura. Es importante considerar el hecho de que en grandes yacimientos, de larga y compleja evolución como los pórfidos cupríferos o los yacimientos ferríferos tipo Kiruna, el proceso de formación puede incluir las etapas hipotermal, mesotermal y epitermal (tardía). Esto se expresa tanto en la mineralización como en la alteración hidrotermal asociada (p. ej., la mineralización principal asociada a la zona potásica de un pórfido cuprífero es hipotermal, pero aquella relacionada con la zona fílica es mesotermal).

**HORNFELS:** Ver rocas corneanas (= córneas).

**HOT SPRING:** En términos literales corresponde a fuente o manantial caliente. En la terminología de los tipos de yacimientos epitermales, designa a aquellos depósitos, generalmente de oro diseminado asociados a antiguos campos geotérmicos, esto es, muy próximos a la superficie. Otros tipos principales de depósitos epitermales son los denominados Bonanza (filones) y Carlin (oro diseminado en rocas pelíticas carbonatadas, ricas en materia carbonosa).

**HUNDIMIENTO DE BLOQUES** (en inglés: *block caving*): Método de explotación subterránea aplicado a grandes yacimientos de formas triextendidas, como los pórfidos

cupríferos. A medida que los bloques diseñados van siendo hundidos y sus rocas mineralizadas extraídas, y el proceso progresa hacia niveles más profundos, se va formando un cráter de subsidencia en la superficie de la explotación. Se trata de un método de importante utilización, que puede ser empleado solo (p.ej., El Teniente, Chile) o en combinación con explotaciones a cielo abierto (p.ej., Río Blanco; Chile).



IGME: Instituto Geológico y Minero de España. Es la institución encargada de la cartografía del territorio nacional por mandato del Estado. Entre las funciones del IGME se encuentran las siguientes: a) elaborar y publicar la cartografía geológica nacional (Plan MAGNA) así como las cartografías temáticas para los programas y planes nacionales, las obras de infraestructura y la ordenación del territorio, y para otros fines dentro del ámbito de actividad del IGME; y b) estudiar el terreno continental, insular y el fondo marino en cuanto sea necesario para el conocimiento del medio geológico e hidrogeológico, en sus múltiples vertientes, tales como sus recursos, los procesos naturales, la vulnerabilidad de la actividad humana y sus implicaciones medioambientales, entre otras, así como realizar las correspondientes observaciones, controles e inventarios. Ver además SERNAGEOMIN.

INCLUSIONES FLUIDAS: Son aquellas presentes en cavidades presentes en un cristal (p.ej. de cuarzo), producto de un defecto en su proceso de crecimiento que dejó ese vacío. Las inclusiones pueden estar formadas por varias fases: líquida, gaseosa y sólidos cristalinos (generalmente cloruros de Na o Ca). Se considera que el fluido que rellena las cavidades corresponde a la composición de la solución hidrotermal homogénea de la que se formó el cristal. La salinidad de la inclusión fluida se puede determinar mediante criometría, vale decir, el descenso de la temperatura de cristalización del agua producido por efecto de su mayor contenido de sales. Respecto a su utilización para determinar la temperatura de formación del cristal, ver Geotermometría.

INDICADAS: Ver reservas.

INFERIDAS: Ver reservas.

INTRUSIVO: Se dice de un cuerpo geológico, normalmente de origen magmático (también hay diapiros salinos intrusivos y cuerpos peridotíticos de emplazamiento tectónico intrusivo) que se emplazó en un macizo rocoso preexistente. Dicho

emplazamiento ocurre ya sea: a) hundiendo y asimilando las rocas en la que se intruye (caso de los batolitos); b) aprovechando y expandiendo zonas de debilidad (p.ej., un dique en una zona de falla); c) abriéndose espacio entre dos estratos (filones mantos y lacolitos); o d) emplazándose de modo forzado generando deformación. El primer mecanismo (a) (en inglés *magmatic stoping*), desempeña un papel principal en el emplazamiento de los batolitos de tipo andino. Los cuerpos magmáticos intrusivos desempeñan un papel principal en la formación de la mayoría de los yacimientos metalíferos hidrotermales, tanto como fuente térmica para activar celdas de convección, como por su aporte de metales y de elementos mineralizadores (S, Cl, etc). En algunos casos el intrusivo es también importante por su contribución de agua magmática y su participación en el desarrollo de estructuras de origen explosivo.

IOCG: Es un término muy amplio y por lo tanto poco preciso y ambiguo. Se trata de un acrónimo a partir de las iniciales de *iron ore, copper, gold*. Designa los yacimientos cuya mineralización de cobre y oro está asociada a óxidos de Fe: magnetita y/o hematita. El interés por estos yacimientos surgió a raíz del descubrimiento en 1975 del yacimiento de Olympic Dam en el sur de Australia, que alberga varios miles de millones de toneladas de minerales de cobre, oro, uranio y tierras raras asociados a óxidos de Fe. En Chile, están representados (de alguna manera) por el yacimiento de Candelaria, en Copiapó. Según se asocien con magmas más o menos alcalinos estos depósitos presentan o no enriquecimiento en U, Y y elementos de las tierras raras. En Chile la faja con mejores expectativas para encontrar este tipo de yacimientos corresponde a los afloramientos de secuencias cretácicas intruidas por granitoides de 120-100 Ma, que incluye depósitos ferríferos del tipo Kiruna, así como yacimientos de Cu-Au-(Fe) con ganga de actinolita o de tipo skarn.

IONES METÁLICOS COMPLEJOS: En las soluciones hidrotermales sulfuradas, los metales pesados (Cu, Zn, Ni, Cd, Ag, Au, Hg, etc.) no se encuentran disueltos en forma iónica simple (lo que no es factible, por el bajísimo producto de solubilidad de sus sulfuros), sino formando iones complejos con elementos no-metálicos o metaloides. Por ejemplo, el Au se disuelve bajo la forma de  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ , Hg bajo la forma de  $\text{HgS}_2^{2-}$  etc., mientras Cu, Zn, Pb y otros metales se disuelven formando iones complejos clorurados. Estos iones complejos son tanto más estables cuanto más pesado es el elemento metálico. Su precipitación ocurre cuando se desestabilizan por cambios bruscos de T, P o composición química. Por ejemplo, en el caso del  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ , su pH ideal es ligeramente ácido (alrededor de pH 5.5). Si el pH disminuye, entonces:  $\text{HS}^- + \text{H}^+ = \text{H}_2\text{S}$ ; si aumenta,  $\text{HS}^- + \text{OH}^- = \text{S}^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ . Por lo tanto, al disminuir la concentración de  $\text{HS}^-$  el complejo se desestabiliza y precipita Au. La lixiviación cianurada de oro, en la cual el metal es disuelto en forma de  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  constituye una aplicación industrial del mismo mecanismo.

En general, existe concordancia entre los patrones de zonación de minerales en un yacimiento complejo y la estabilidad de los iones complejos que forman los respectivos metales. Ver además: hidrometalurgia, hidrotermal, zonación.

**IONIZACIÓN:** Se denomina así al proceso por el cual un elemento o grupo de elementos (p.ej.,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) pierde o gana electrones. Por ejemplo, al disolver  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en agua  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$  (donde los electrones de los  $\text{H}^+$  han sido transferidos al grupo  $\text{SO}_4^{2-}$ ). La ionización ocurre generalmente en soluciones acuosas, facilitada por el carácter eléctrico bipolar de la molécula de agua. Sin embargo, también puede ocurrir en un gas (plasma).

**ISÓTOPOS** (en inglés: *isotopes*): El modelo simple de átomo propuesto por E. Rutherford en 1919, aún válido para muchos propósitos, considera que el átomo está constituido por tres clases de partículas: protones (masa 1, carga +1), neutrones (masa 1, carga 0) y electrones (masa 0,0005, carga -1). Los neutrones se comportan como si estuvieran formados por la unión de un protón y un electrón (ver radioactividad). Protones y neutrones se encuentran en el núcleo del átomo, mientras los electrones se sitúan en órbitas en torno al núcleo, y las más externas definen la valencia del respectivo elemento. La naturaleza del elemento químico, (es decir, de qué elemento se trata) está determinada por el número de protones que éste posee, mientras que la masa del átomo depende de la suma de sus protones y neutrones. Cuando dos átomos del mismo elemento poseen diferente masa, se dice que son distintos isótopos de ese elemento. Por ejemplo, existe un isótopo de oxígeno de masa 16 (8 protones y 8 neutrones:  $^{16}\text{O}$ ) que es el más abundante y uno muy poco abundante de masa 18 (8 protones y 10 neutrones:  $^{18}\text{O}$ ). Los isótopos pueden ser estables o radioactivos (ver radioactividad). Los isótopos estables poseen similares propiedades químicas, pero propiedades físico-químicas y bioquímicas ligeramente diferentes. Esto se utiliza para diversos e importantes propósitos, como paleo-determinaciones de la temperatura atmosférica y de las aguas oceánicas; determinación del origen geoquímico o bioquímico del azufre de la pirita y otros sulfuros; estimación del origen cortical o sub-cortical del Pb de yacimientos minerales y del grado de contaminación cortical de magmas, considerando las razones isotópicas de Sr ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ); determinación del origen químico o bioquímico de los nitratos, etc.

**ISÓTROPICO:** Se dice de un cuerpo cuyas propiedades físicas, físico-químicas o químicas no presentan diferencias sistemáticas según la dirección en la cual se miden dichas propiedades o sus variaciones.

## J

JASPE (en inglés: *jasper, chert*): Es un sinter silíceo, vale decir, un precipitado de sílice formado por evaporación del agua (y/o descenso de su temperatura) sobre o cerca de la superficie de la Tierra. Es común en manantiales calientes y campos geotérmicos. El jaspe rojo ferruginoso es denominado *carneola* por los mineros en Chile.

JAROSITA: Sulfato hidratado de Fe y K ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) perteneciente al grupo de la alunita. Es un mineral secundario de color amarillo que se presenta formando costras o recubrimientos en zonas de oxidación de minerales sulfurados ricos en pirita. Ver además: alunita.

## K

KARST: El término designa la topografía de hundimientos, formación de cuevas, y drenaje subterráneo que se producen en terrenos de afloramientos de rocas carbonatadas, en regiones de clima lluvioso. Estos rasgos morfológicos e hidrológicos son consecuencia de la disolución del carbonato de calcio:  $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ . Aunque los yacimientos estratoligados de Pb-Zn del tipo *Mississippi Valley* se formaron debido a la acción de extensos sistemas hidrotermales, parte de la mineralización se asocia a rasgos de probable origen kárstico en las rocas carbonatadas que albergan la mineralización sulfurada.

KIMBERLITAS: Se denominan así las rocas presentes en estructuras tipo chimeneas de brecha (= diatremas) profundas constituidas por material peridotítico originado en el manto, en las cuales se puede encontrar mineralización diseminada de diamantes. La parte superficial de la brecha, oxidada, presenta un color amarillento (*yellow ground*) y la inferior no oxidada, un color azulado (*blue ground*). La erosión de las chimeneas (= pipas) kimberlíticas da lugar a la formación de depósitos secundarios de diamantes del tipo placer, ya sea situados en sedimentos aluviales o en sedimentos marinos costeros (p.ej., en Namibia SW de África).

KIRUNA: Kiruna Vaara es un gran yacimiento de hierro (magnetita) de origen magmático, situado en el norte de Suecia. Define un tipo de yacimiento de hierro (= fierro) denominado *Kiruna*, equivalente al de *volcanic hosted magnetite* (magnetita en rocas volcánicas). Estos yacimientos se caracterizan por su asociación con magmas sub-

volcánicos calcoalcalinos o alcalinos y una mineralogía que incluye piroxenos fibrosos o actinolita, apatita (= apatito), escapolita y contenido menores de sulfuros, así como menores contenidos en V y Ti. Los yacimientos ferríferos cretácicos de la Cordillera de la Costa de Chile y del sur del Perú pertenecen a este tipo, así como el yacimiento plioceno de El Laco (Antofagasta, Chile).

**KUROKO:** Son yacimientos del tipo sulfuros masivos (= macizos) formados en un ambiente submarino. Los depósitos tienen una raíz consistente en una mineralización tipo stockwork de pirita-calcopirita y una parte superior formada sobre la superficie del fondo marino contemporáneo, constituida por agregados finos de sulfuros polimetálicos (Cu, Pb, Zn). Estos sulfuros presentan una fina textura y color negro (*kuroko* es una palabra japonesa que significa *mena negra*) si los sulfuros de Pb y Zn dominan la mineralización. También pueden observarse rasgos típicamente sedimentarios en las menas masivas depositadas sobre el fondo marino. Estos yacimientos son abundantes en Japón, donde fueron descritos y caracterizados tipológicamente. En Chile, los yacimientos cupríferos estratiformes del distrito Punta del Cobre presentan ciertas analogías con este tipo de depósitos. Quizás si el ejemplo más notable de este tipo se encuentre en España: Rio Tinto, que es el principal yacimiento de una provincia metalogénica (Faja Pirítica Ibérica) que se extiende de España a Portugal, y que incluye otros yacimientos como Tharsis, Aznalcollar, La Zarza, Aljustrel, y Neves Corvo (entre otros).

## L

**LAMPRÓFIROS:** Se denomina así a rocas de afinidad alcalina, constituidas exclusivamente por minerales ferromagnesianos, y generalmente presentes en forma de diques. Investigadores de la ULS (Universidad de La Serena, Chile) encontraron en el distrito Los Mantos de Punitaqui (Cu-Au-Hg, Región de Coquimbo, Chile) pseudolamprófiros. Estos están constituidos por andesitas porfíricas cuyas plagioclasas albitizadas presentan color negro brillante y aspecto de anfíbolos (= anfíboles) debido a la presencia de finas inclusiones de magnetita. En consecuencia, puede que algunos lamprófiros presentes en distritos mineros tengan similar origen.

**LATERITA:** Los suelos lateríticos se desarrollan bajo climas cálidos lluviosos y pueden alcanzar en condiciones topográficas favorables varias decenas de metros de espesor. Estos suelos se caracterizan por presentar color rojo. Diversos tipos de yacimientos se pueden formar durante la laterización de las rocas ígneas:

- Rocas félsicas aluminosas (ricas en feldespato) → yacimientos de bauxita: gibbsita:  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , boehmita:  $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ , y diáspora:  $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ .
- Rocas máficas ricas en Fe → óxidos de Fe.
- Rocas máficas magnesianas ricas en Ni → óxidos de hierro y garnierita (mena verde de Ni).

LEY (en inglés: *grade*): El término denota el porcentaje de un elemento químico o de un mineral industrial, ya sea en una muestra, en un bloque mineralizado o en un yacimiento (ley media). La ley media de un depósito depende de la parte de él que se considere, y naturalmente desciende en la medida que se incluyen zonas más pobres en el cálculo de sus reservas. En consecuencia es normal que se genere una relación inversa entre la magnitud de las reservas calculadas y su ley media, a menos que el crecimiento de las reservas se deba al descubrimiento de un nuevo cuerpo mineralizado más rico, ya sea en el mismo yacimiento o en sus inmediaciones.

LEY DE CORTE (en inglés: *cut off grade*): El término designa aquella ley bajo la cual el mineral extraído no es enviado a la planta para su beneficio metalúrgico. Puesto que esa ley puede variar conforme a factores económicos o tecnológicos, el mineral de ley inferior a la de corte, pero que presenta contenidos apreciables de mineral, debe ser apilado separadamente por su posible valor futuro.

LIMONITA (en inglés: *limonite*): Agregado de óxidos, óxidos hidratados, hidróxidos de hierro y sulfatos de Fe y K que se forman durante la oxidación de los sulfuros en la parte superior de un yacimiento (gossan). Las limonitas incluyen minerales tales como la goethita, jarosita, y hematita (= hematites) entre otros. El tipo más común es la goethita, que se forma de la siguiente manera (ecuación simplificada):  $\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}^+$ . Las limonitas de los gossans son utilizadas por su valor diagnóstico para estimar el probable interés de la mineralización subyacente. La limonita forma un compuesto de baja solubilidad con molibdeno (ferromolibdenita), que dificulta la migración de ese metal. De ahí que el análisis geoquímico por Mo sea mejor indicador de la mineralización principal que el análisis por Cu, elemento que migra fácilmente. Esto es especialmente pertinente en exploración de pórfidos cupríferos. Las mezclas de limonitas con minerales enriquecidos en Cu reciben el nombre de *almagre* (Chile). En España el término *almagre* denota un agregado de sulfatos en los que predomina la alunita con óxidos de Fe (de ahí su color rojo). Ver además: gossan, celdillas residuales.

LITOLÓGIA (en inglés: *lithology*): El término abarca todo lo referente a las rocas, incluido su metamorfismo y alteración hidrotermal. Junto con la estructura (control estructural), la

litología ejerce un control principal sobre la distribución de la mineralización en un yacimiento

LITOSTÁTICA: Ver presión litostática.

LIXIVIACIÓN (en inglés: *leaching*): Efecto de disolución ejercido por una solución sobre los materiales a través de los cuales circula. La lixiviación desempeña un papel muy importante en la formación de yacimientos metalíferos. Por ejemplo, los metales contenidos en secuencias sedimentarias pueden ser lixiviados por soluciones salinas durante su diagénesis, y depositados en contextos favorables. Otro tanto hacen las soluciones hidrotermales al atravesar secuencias volcánicas o sedimentarias. También la lixiviación desempeña un papel principal en la formación de sulfuros secundarios y de depósitos exóticos de cobre a expensas del metal lixiviado desde la zona de oxidación. La lixiviación es un proceso fundamental en las operaciones hidrometalúrgicas (p. ej., lixiviación en pila).

LOPOLITO: Cuerpo ígneo intrusivo y concordante que presenta una forma de embudo y alcanza decenas de km de diámetro. Los lopolitos se encuentran en ambientes tectónicos de escudo, y a ellos se asocian importantes yacimientos de Cr, Ni y platinoides (Pt, Os, Ir, etc.), como Bushveld, en Sudáfrica. El lopolito de Sudbury, en Canadá, es rico en minerales de Ni y Cu.

## M

MAAR: Depresión formada en el afloramiento de una diatrema, chimenea de brecha asociada a un sistema volcánico. Esta depresión puede albergar un pequeño lago, cuyos sedimentos pueden a su vez ser mineralizados por la actividad fumarólica-hidrotermal del sitio. Los maars se forman como consecuencia de una erupción freatomagmática. Excelentes ejemplos de este tipo de vulcanismo se pueden encontrar en la provincia volcánica de Ciudad Real (España) y en el Macizo Central Francés (Auvernia)

MACIZA (MASIVA) (en inglés: *massive*): Denota un tipo de textura maciza (= masiva) de la mineralización. El término designa igualmente una clase de yacimientos: depósitos sulfurados macizos (= sulfuros masivos).

MACIZO (en inglés: *stock*): Designa un cuerpo intrusivo de menor tamaño que un batolito. Normalmente los macizos constituyen apófisis de los batolitos, desde los cuales

se elevan unos 2 km para situarse a una profundidad similar respecto a la superficie. Los pórfidos cupríferos corresponden a macizos, aunque su relación respecto a los batolitos puede ser más compleja. En España y Francia el término tiene connotación morfológica, para designar a una montaña o conjunto de montañas (cadena), por ejemplo, Macizo Ibérico, Macizo Central Francés.

**MACIZO ROCOSO** (en inglés: *rock mass*): El término se refiere al enfoque geomecánico o geotécnico de la masa rocosa *in situ* para su intervención ingenieril (labores subterráneas, corrección de taludes, etc.). Dicho enfoque considera tanto las propiedades físicas de la roca como el efecto de las estructuras que presenta (fracturas, pliegues) y de los cuerpos de aguas subterráneas respecto a su probable comportamiento geomecánico y geotécnico.

**MÁFICA** (en inglés: *mafic*): Se denomina rocas máficas a aquellas rocas ígneas ricas en minerales ferromagnesianos (olivino, piroxenos, anfíbolos = anfíboles), tales como los gabros, basaltos y andesitas basálticas. Las rocas máficas presentan colores oscuros, a diferencia de las félsicas, caracterizadas por colores gris claro. No obstante, el color es también función de la textura y en general texturas finas comunican a la roca un color más oscuro. La presencia de rocas máficas poco alteradas, o con alteración hidrotermal potásica o propilítica, constituye un factor favorable para neutralizar el drenaje ácido.

**MAGMATISMO CALCOALCALINO** Es el tipo de magmatismo característico de los márgenes tectónicos con subducción de placa oceánica (ya sea bajo corteza continental: tipo Andino o bajo corteza oceánica: arcos de islas). Se trata de un magmatismo oxidado, rico en azufre, lo que favorece el desarrollo de yacimientos metálicos sulfurados. Es un magmatismo empobrecido en Fe respecto al magmatismo toleítico. Sin embargo, importantes yacimientos de hierro se asocian a él (en especial de tipo Kiruna). Rocas características de este magmatismo son andesitas y dacitas entre las volcánicas, y dioritas y granodioríticas entre las plutónicas. Sin embargo, el carácter calcoalcalino de una serie magmática no puede ser considerado como un rasgo diagnóstico de subducción. Por ejemplo el vulcanismo mioceno del sureste de España es calcoalcalino pero no relacionado con subducción.

**MANTO** (terrestre): El manto de la Tierra se extiende entre la corteza (5 a 70 km de espesor) y los 2270 km de profundidad, donde limita con el núcleo externo. Se distingue entre un manto superior o litosférico rígido, un manto astenosférico de menor rigidez y un manto inferior, nuevamente rígido. Algunos yacimientos minerales tienen su origen directo en el manto, como los de las chimeneas diamantíferas, los de cromita de carácter podiforme o de lopolitos (con Pt y platinoides).

**MANTO (yacimientos):** Designación tipológica estructural de yacimientos utilizada en Chile y Perú para depósitos estratiformes en secuencias volcánico-sedimentarias, cuya inclinación es moderada (del orden de 40° o menor). Generalmente, estos yacimientos se explotan por el método caserones (= cámaras) y pilares (*room and pillar*).

**MASH** (del inglés: *Melting, Assimilation, Storage and Homogenisation*): El término designa los procesos de fusión, asimilación, almacenamiento y homogenización de materiales magmáticos que se desarrollan en las zonas de subducción bajo la corteza, en el manto sublitosférico. Los magmas generados en esta zona ascienden hacia los niveles corticales superiores, experimentando distintos grados de diferenciación y asimilación en su trayecto. Se supone que la participación de la placa litosférica en este proceso aporta agua y sustancias mineralizadoras y metales, los que favorecen la capacidad metalogénica de los magmas formados en la zona MASH.

**MEDIDAS:** Ver reservas.

**MENA** (en inglés: *ore*): Se entiende por mena un conjunto de minerales de los cuales uno o más de ellos (generalmente de carácter metálico) presenta valor económico. Los minerales sin valor económico que acompañan a la mena (normalmente de carácter no metálico) constituyen la ganga. Mena y ganga son términos ambiguos. Por ejemplo, un sulfuro integrante de la mena, sin interés económico en una mina (p.ej., pirita) no será denominado ganga, mientras que un no metálico (p.ej., baritina = barita) que puede llegar a tenerlo, generalmente se considera como tal. Digamos que el término mena se asocia a la mineralización metálica (con o sin valor económico) y el término ganga a la mineralización no metálica (con o sin valor económico), aunque esto escape a la definición estricta de ambos términos. Ver además: ganga.

**MENA BRECHOSA:** Se califica así a una estructura y/o textura de origen hidrotermal y/o mecánico que confiere a la roca mineralizada el aspecto de una brecha.

**MENSURA (DEMARCACIÓN):** Operación de delimitación topográfica de una propiedad minera con fines legales.

**MESOTERMAL** (en inglés: *mesothermal*): Conforme a la clasificación de Lindgren de los yacimientos hidrotermales sobre la base de su temperatura de formación, corresponde a aquellos cuya mineralización principal se depositó entre 300° y 200° C.

**METAL DE BASE (METAL BÁSICO)** (en inglés: *base metal*): Se denomina así a un grupo de metales que incluye al Cu, Zn, Pb, Cd, Sn y Hg, considerados básicos para la

industria. Otras agrupaciones de metales son las de metales para ferroaleaciones (Cr, Co, Mo, Ni, W y V), metales preciosos (Au, Ag, Pt y Pd) y metales especiales (Sb, As, Be, Bi, Ga, Ge, In, Nb, Ta, Zr y tierras raras).

**METALOGÉNESIS** (en inglés: *metallogenesis*): Disciplina del campo de la geología económica que estudia la formación de los yacimientos metalíferos en un contexto geológico integral. La metalogénesis como tal se desarrolló originalmente en Europa y resaltó la importancia de los procesos sedimentarios y diagenéticos en la formación de yacimientos, así como la posible *herencia* de contenidos metálicos en determinados dominios geológicos. El término (*métallogénie*) fue propuesto por L. de Launais en 1913 y une los de metal (*metallon*) y génesis (*genesis*), ambos del griego clásico.

**METALOTECTO**: Término propuesto por P. Routhier para aquellos factores o contextos geológicos responsables de la formación de determinados tipos de yacimientos que pueden ser utilizados en exploraciones mineras. Por ejemplo, la Falla de Domeyko es un metalotecto para pórfidos cupríferos en el norte de Chile.

**METAMORFISMO** (en inglés: *metamorphism*): Modificación profunda de los rasgos mineralógicos y estructurales de una roca debido al efecto de elevadas temperaturas y presiones. Se reconoce un metamorfismo regional progrado, generado por una elevación sistemática de la temperatura y presión, que afecta fuertemente la mineralogía y estructura de las rocas. Este metamorfismo se origina durante los grandes procesos orogénicos. También existe el metamorfismo de contacto, de carácter térmico, generado por contacto con cuerpos magmáticos intrusivos, cuyos efectos son especialmente mineralógicos. Finalmente, hay un metamorfismo de bajo grado, cuyos efectos son similares a los de la alteración hidrotermal propilítica. Con respecto a este último, aunque en teoría el metamorfismo es isoquímico (vale decir, no implica intercambios importantes de materia con el medio externo), en la práctica está acompañado de metasomatismo y se entremezcla en parte con la alteración hidrotermal. Así por ejemplo en las rocas volcánicas mesozoicas de Chile es difícil distinguir el metamorfismo de bajo grado de la alteración hidrotermal propilítica regional (= alteración regional). Este metamorfismo de bajo grado (*low-grade metamorphism*) fue originalmente definido por D. Coombs en Nueva Zelanda el año 1954, mientras estudiaba la gran secuencia de 8.500 m de grauvacas y tobas en las colinas de Taringatura.

**METASOMATISMO** (en inglés: *metasomatism*): Se entiende por metasomatismo el proceso de reemplazo de los minerales de una roca por otros a través de reacciones que también incluyen el reemplazo de componentes químicos (a diferencia de la concepción "isoquímica" que implica el metamorfismo, en términos teóricos). El metasomatismo se

produce por efecto de fluidos neumatolíticos o hidrotermales. En el caso de yacimientos tipo skarn, dichos depósitos no podrían formarse sin un efecto metasomático superpuesto al metamorfismo de contacto, efecto que aporte los metales y metaloides que constituyen la mineralización económica.

**METEÓRICAS:** Se denomina aguas meteóricas (o de origen meteórico) a aquellas provenientes de la superficie terrestre. Las aguas meteóricas participan en distinto grado en la formación de la mayoría de los yacimientos hidrotermales en conjunto con aguas de origen magmático. Por otra parte, las aguas meteóricas son responsables de la formación de las zonas de oxidación y de enriquecimiento secundario (cementación de sulfuros), y de la generación de yacimientos exóticos.

**METEORIZACIÓN:** Proceso de alteración y destrucción *in situ* de las rocas, producto de los agentes atmosféricos (agua, aire, temperatura) y biológicos (efectos físicos, químicos y bioquímicos de plantas, hongos, microorganismos y animales). La meteorización produce una fragmentación de la roca, así como cambios químicos y mineralógicos. En términos termodinámicos, constituye una aproximación a un estado de equilibrio respecto a las condiciones ambientales de presión, temperatura y composición química en que se encuentra la roca en la superficie de la Tierra. El producto final de la meteorización es el desarrollo de un suelo. En general, se distingue entre meteorización química, física y biológica, cuya importancia relativa es función del clima, de la altura, de la topografía y de la cubierta vegetal. La meteorización desempeña un papel esencial en la formación de yacimientos del carácter residual, vale decir, enriquecidos por la disolución y migración de los componentes sin valor económico de la roca. También desempeña un papel importante en la formación de las zonas de oxidación de los yacimientos sulfurados e indirectamente, en el depósito de sulfuros enriquecidos de cobre, así como en la de yacimientos exóticos de cobre y de uranio tipo *roll front*.

**MINERALES INDUSTRIALES** (en inglés: *industrial minerals*): Este término incluye una amplia gama de minerales que tienen aplicaciones industriales o son utilizados para la síntesis de compuestos inorgánicos o la obtención de elementos como los de carácter alcalino. Algunos minerales industriales tienen múltiples y muy variados usos: por ejemplo la halita (NaCl) se utiliza como condimento, para fundir la nieve de los caminos, para la fabricación de carbonato de sodio (*soda*), para la obtención de Na y Cl, etc. En algunos casos, los productores de un mineral industrial ofrecen numerosos tipos de él, cada uno adecuado a un fin específico (caso de las arcillas). El procesamiento físico, químico o físico-químico de un mineral industrial, así como el valor económico respectivo, pueden ser muy diferentes según el uso al que se destina. Por ejemplo, es muy distinto vender CaCO<sub>3</sub> para la industria cementera que CaCO<sub>3</sub> precipitado para la

fabricación de pasta dental. Se estima que el consumo y las exigencias de calidad respecto a los minerales industriales son un buen índice del grado de desarrollo de un país. Efectivamente estos minerales participan en todos los ámbitos (vidrios, fabricación de papel, cosméticos, medicamentos, procesos químicos, incluso en el procesamiento metalúrgico de los minerales metálicos). Chile no es un gran productor de minerales industriales, con la notable excepción de las sales del Norte Grande: caliche salitrero (nitratos, iodatos y sulfatos), cloruro de sodio del Salar Grande, sales de litio y potasio del Salar de Atacama, etc. Por el contrario, España lo es, y en casi todos los ámbitos de la minería y procesamiento de minerales industriales, destacando en este apartado las arcillas especiales. La casi segura evolución de la industria automotriz hacia la fabricación de *híbridos* (motor convencional + motor eléctrico) y automóviles eléctricos, puede dar un elevado valor al litio del Salar de Atacama (Chile), dado el uso de ese elemento en la elaboración de acumuladores eléctricos de alto rendimiento. Los minerales industriales son también denominados no metálicos.

**MINERALIZACIÓN** (en inglés: *mineralization*): El término denota el proceso de formación de minerales y generalmente se utiliza para minerales de interés económico. Por extensión, el término se utiliza también para designar una concentración de minerales ya formados, por ejemplo: *existen indicios de mineralizaciones de cobre en Quebrada Grande*.

**MINERALIZADORA**: Sustancia que facilita un proceso de mineralización. Por ejemplo, las sustancias volátiles como los compuestos de azufre y de halógenos, desempeñan junto con el agua un importante papel como agentes mineralizadores.

**MODELO** (en inglés: *model*): Es una representación idealizada y simplificada de la realidad, que se utiliza para describir o explicar un fenómeno físico o proceso, o para caracterizar los rasgos comunes que presenta un conjunto de objetos naturales. Por ejemplo, el modelo del interior de la Tierra, el modelo del ascenso de cuerpos magmáticos en la corteza, el modelo de yacimientos cupríferos de tipo porfírico, etc. Los modelos acompañan y completan la elaboración de hipótesis. Pueden ser de carácter conceptual y utilizar ecuaciones (generalmente diferenciales) en la descripción de sus distintos componentes, o bien ser de carácter empírico (descriptivos, más que interpretativos). Los modelos metalogénicos, que describen y explican los principales tipos de yacimientos minerales (en particular los de carácter metalífero), desempeñan un papel principal en su estudio y exploración. Los modelos empíricos consisten en una descripción de los atributos básicos de un determinado tipo de yacimiento mineral, por ejemplo, morfología, litología, mineralogía, estructura. No importa entender cómo se relacionan estos atributos más allá del mero hecho de saber que están presentes. Por su

parte, los modelos conceptuales (= teóricos) intentan relacionar dichos atributos a través de procesos geológicos y físico-químicos. Adicionalmente, se puede agregar información sobre las anomalías geofísicas y geoquímicas generadas por la presencia del yacimiento tipo.

**MODELO DE BLOQUES** (en inglés: *block model*): Se denomina así a la representación del yacimiento a través de su división en múltiples bloques, cuyo tamaño se relaciona con las características del método de explotación a utilizar. Cada uno de los bloques así definidos contiene la información geológica, mineralógica, de leyes, etc, que es necesaria para la toma de decisiones durante las etapas de planificación y explotación.

**MODELO GEOMECÁNICO** (en inglés: *geomechanical model*): Este modelo presenta las características geomecánicas de las rocas de un yacimiento en un modelo de bloques, que se utiliza para predecir su comportamiento durante la explotación minera del depósito.

**MODELO GEOMETALÚRGICO** (en inglés: *geometallurgical model*): La geometalurgia tiene por objeto utilizar toda la información disponible (mineralógica, litológica, estructural, de leyes, etc.) para predecir el comportamiento de las menas durante sus procesos de tratamiento metalúrgico, información que se integra al modelo de bloques.

**MOLIBDENITA** (en inglés: *molybdenite*): Junto con las mayores reservas mundiales de cobre, Chile posee igualmente las de molibdeno, también presentes en sus yacimientos porfíricos de cobre. El molibdeno se presenta como molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), mineral gris claro brillante que cristaliza en el sistema hexagonal y deja una raya gris análoga a la del grafito. La baja dureza del mineral se explica por su estructura cristalina que facilita el desprendimiento de *hojas* del mineral y que permite su uso como lubricante en casos especiales. La molibdenita de los pórfidos cupríferos presenta contenidos importantes de renio, debido a la similitud cristaloquímica de ambos elementos (que permite el reemplazo de Mo por Re).

**MVT** (del inglés: *Mississippi Valley type*): Tipo de yacimientos de Pb-Zn emplazado en rocas carbonatadas marinas de la plataforma continental (calizas alteradas en parte a dolomías). Sus distritos son extensos, cubriendo cientos e incluso miles de  $\text{km}^2$ , aunque los depósitos individuales son pequeños (generalmente  $< 2 \text{ Mt}$ ). Normalmente el zinc supera al plomo, y la ley conjunta es inferior al 10%. Estos yacimientos se formaron con posterioridad al depósito de las rocas carbonatadas, ya sea durante la etapa diagenética o una posterior, por efecto de soluciones salinas originadas en la propia secuencia sedimentaria, y con aportes de aguas meteóricas.

## N

**NATIVO:** Se dice de un elemento presente en un yacimiento en su forma metálica pura, por ejemplo, Cu nativo ( $\text{Cu}^0$ ), Ag nativa ( $\text{Ag}^0$ ). Excepto en el caso del oro o de los platinoides, los metales nativos se depositan por un proceso de oxidación del mineral sulfurado, seguido por una reducción química que reduce el catión al estado metálico.

**NEUMATOLÍTICA:** Etapa tardía de la cristalización de un magma, que es posterior a la pegmatítica, y se desarrolla entre unos  $600^\circ$  y  $400^\circ\text{C}$ . Para esto tiene que existir una gran concentración de volátiles que dan lugar a la formación de minerales como la turmalina. En la etapa neumatolítica, se forman minerales por reacción entre fases gaseosas, por ejemplo,  $\text{SnF}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SnO}_2 + 4\text{HF}$ .

**NIVEL FREÁTICO:** Es aquel nivel debajo del cual todos los espacios interconectados están saturados de agua. Sobre el nivel freático se encuentra la zona vadosa, donde el agua se encuentra de paso en su desplazamiento hacia el nivel freático. El nivel freático separa la zona de oxidación de la zona de cementación (= enriquecimiento secundario) en los yacimientos de cobre sometidos a oxidación. Esto es así porque debajo del nivel freático dominan las condiciones reductoras (niveles muy bajos de  $\text{O}_2$ ). El nivel freático también desempeña un papel importante en la química de las soluciones durante la formación de depósitos epitermales porque al sobrepasarlo las soluciones encuentran un ambiente oxidante (niveles altos de  $\text{O}_2$ ) que inducen el paso del ion sulfuro a sulfato. Esto se traduce en la precipitación del oro y un fuerte aumento de la acidez por la formación de ácido sulfúrico (a expensas de sulfuro o sulfidato:  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$ ). Las explotaciones mineras, ya sean subterráneas o a cielo abierto pueden perturbar el nivel freático local. Al situarse bajo este pueden requerir importantes inversiones de energía para evacuar las aguas que ingresan a las labores en explotación mediante bombeo. Por su parte el bombeo induce la formación de un cono de depresión del nivel freático (impacto ambiental). Por otra parte, las aguas subterráneas pueden ser un importante vehículo de contaminación entre la mina y el drenaje local y regional (impacto ambiental).

**NÓDULOS:** Los nódulos de manganeso forman extensos yacimientos, enriquecidos en Cu, Ni y otros metales, dispuestos sobre la superficie del fondo oceánico profundo. Pueden alcanzar el tamaño de una pelota de tenis y se distribuyen a razón de varios nódulos por  $\text{m}^2$ . Se han considerado como una futura fuente de metales, aunque su extracción es costosa y difícilmente competitiva con las explotaciones continentales de manganeso y otros metales en las actuales condiciones.

**NO METÁLICOS:** Ver Minerales Industriales.

**NORITA:** Roca de composición gábrica, presente en yacimientos de cromita y platinoides del tipo Bushveld (lopolitos de regiones tectónicas tipo escudo). Ver lopolito.

## O

**OFIOLITAS:** Secuencias de rocas volcánicas máficas submarinas fuertemente alteradas. Estas rocas alteradas se generan principalmente en las dorsales oceánicas, donde magmas basálticos toleíticos sufren hidratación durante su proceso de cristalización. Los complejos ofiolíticos acompañan la presencia de yacimientos volcanogénicos de sulfuros macizos (VMS), p.ej. del tipo Chipre.

**ONZA TROY** (en inglés: *troy ounce*): Unidad de peso inglesa que ha sobrevivido a la adopción del sistema métrico y continúa utilizándose para expresar las reservas de metales preciosos, en particular del oro. Una onza troy equivale a 31.1 g.

**OROGENO:** Se denomina así a una cadena montañas producto de esfuerzos compresivos horizontales en una faja de inestabilidad tectónica (por ejemplo, los Andes, los Himalayas). El proceso tectónico que da lugar a la formación de esa cadena es complejo y se denomina orogénesis. Los procesos orogénicos se interpretan en términos de la teoría de la tectónica de placas. Los orógenos de tipo Andino, que implican la subducción de corteza oceánica bajo un borde continental presentan ricas mineralizaciones de elementos sulfófilos (Cu, Mo, Pb, Zn, etc), así como de hierro y metales preciosos (Au y Ag).

**ORTOMAGMÁTICA:** Etapa de la cristalización de un magma durante la cual se forman las rocas ígneas propiamente tales, a temperaturas superiores a 800°C. Esta etapa es seguida por la etapa pegmatítica (800°-600°C), la pneumatolítica (600°-400°C) y la hidrotermal (400°-50°C). Durante esta etapa se forman yacimientos como los de cromita y platinoides en cuerpos lopolíticos.

**OXIDACIÓN:** Se entiende por oxidación de un elemento químico la cesión de uno o más electrones a otro elemento (el cual se reduce). El oxígeno desempeña un papel principal en los procesos de oxidación en la atmósfera y la hidrósfera, y uno importante (aunque más complejo) en los de diferenciación magmática. Al respecto, la oxidación reviste especial importancia en la formación de las series magmáticas oxidadas con magnetita y series reducidas con ilmenita (propuestas por S. Ishihara). A las primeras, presentes en el arco magmático mas cercano a la fosa oceánica, se asocian yacimientos sulfurados de

Cu, Mo, etc., depósitos ferríferos y epitermales de Au-Ag, en tanto que los de Sn y W acompañan a un magmatismo menos oxidante, más alejado de la fosa oceánica. Es el caso de Chile (Cu-Fe-Au) y Bolivia (Sn-W), que se repite con una notable simetría especular en el margen del Pacífico Occidental.

## P

**PALEOSUPERFICIE:** El término alude a la superficie (hoy erosionada) que existía cuando un yacimiento se formó o se enriqueció por efectos secundarios.

**PALLACO:** Término utilizado en Bolivia para designar concentraciones detríticas de minerales acumuladas en los faldeos de cerros mineralizados, como Cerro Rico de Potosí (Sn-Ag). Su equivalente en Chile son los *papeos* de minerales de hierro presentes en los faldeos de Desvío Norte y otros yacimientos.

**PARAGENESIS:** Designa la secuencia de minerales depositados en un yacimiento, indicando su relación de tiempo mediante un diagrama que muestra los nombres de los minerales en el eje Y (ordenada) y sus relaciones temporales en el eje X (abscisa). La paragénesis se determina en muestras que son estudiadas macroscópica y microscópicamente: si un mineral corta a otro, el que corta es más joven; si uno reemplaza a otro, el reemplazante es más joven, igual que el que rodea a otro; si están interdigitados son contemporáneos, etc. Puesto que la paragénesis refleja el efecto de un pulso mineralizador, nuevos pulsos pueden llevar a la repetición, al menos parcial, de la secuencia paragenética inicial. Es importante considerar que la paragénesis ilustra lo que ha ocurrido en un yacimiento a lo largo del tiempo, mientras que la zonación describe el efecto del proceso mineralizador en el espacio. Ver zonación.

**PEGMATITAS** (en inglés: *pegmatites*): Son rocas constituidas por grandes cristales de tamaño centimétrico a métrico, que deben su desarrollo a la movilidad iónica producto de una alta concentración de sustancias volátiles. Las pegmatitas están constituidas por minerales de cristalización tardía (eutéctico ternario); cuarzo, micas, feldespato K y de Na, y otros minerales secundarios (turmalina, topacio, etc.). Las pegmatitas se forman a partir de fluidos residuales de la cristalización y se sitúan en una posición intermedia entre los magmas normales, los fluidos neumatolíticos y las soluciones hidrotermales. Las pegmatitas de Chile no presentan minerales secundarios de interés, sí en cambio los presentan las de Argentina, asociadas a magmas más alcalinos.

PERIDOTITAS (en inglés: *peridotites*): Son rocas ultramáficas constituidas por olivino y piroxeno, típicas de la composición del Manto. Cuando ocurren procesos de acreción de terrenos exóticos al continente, se puede producir ascenso diapírico de materiales del Manto. Este es el caso de las peridotitas presentes en la Cordillera de Nahuelbuta (Cordillera de la Costa, en el sur de Chile), que presentan contenidos sub-económicos de cromitas de tipo podiforme. En España existen importantes afloramientos de peridotitas en Galicia (p.ej, Macizo de Herbeira) y Andalucía (p.ej., afloramientos de Ronda).

PERTENENCIA (en inglés: *mining property*): El término designa una unidad de propiedad minera que cuenta con respaldo legal. El conjunto de pertenencias que integran una propiedad minera queda delimitado en el terreno mediante hitos establecidos por un topógrafo autorizado a cargo de la mensura. En Chile, la propiedad minera es registrada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

pH (POTENCIAL DE HIDRÓGENO). Es una medida de la concentración de hidrogeniones  $[H^+]$  en una solución acuosa y se expresa como  $pH = -\log [H^+]$ . El agua pura a 25°C se encuentra débilmente ionizada a través del siguiente equilibrio:  $H_2O = H^+ + OH^-$ , y el producto de equilibrio ( $K_w$ ) es  $[H^+] [OH^-] = 10^{-14}$  moles/litro. Así  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$  (la concentración de hidrogeniones es igual a la de oxidrilos =  $10^{-7}$ ). Por esto el pH del agua pura es 7 ( $pH = -\log [H^+] = -\log (10^{-7}) = 7$ ). Sin embargo, por efecto de la adición de un ácido o de un hidróxido (base) dicha relación se altera y la solución se vuelve más ácida o más alcalina. Por ejemplo, una solución de HCl de concentración molar (moles/litro)  $10^{-3}$  tendrá  $pH = 3$  ( $pH = -\log [H^+]$ ). Esto es así porque el ácido está casi completamente dissociado (ácido fuerte) y la concentración inicial de  $H^+$  ( $10^{-7}$ ) es tan baja que puede ser despreciada frente a  $10^{-3}$ . En este caso, la concentración de  $OH^-$  baja a  $10^{-11}$  para mantener el equilibrio ( $K_w = [H^+] [OH^-] = 10^{-3} \times 10^{-11} = 10^{-14}$ ). También la hidrólisis de una solución formada por un ácido fuerte-base débil o de un ácido débil-base fuerte produce un cambio del pH, que se hará más ácido en el primer caso y más alcalino (básico) en el segundo. Por ejemplo, la reacción de hidrólisis  $CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$  consume hidrogeniones y por lo tanto, sube el pH de la solución (el pH se hace más alcalino). El pH tiene un importante papel en el control de las soluciones hidrotermales (disolución-precipitación de metales), así como en el enriquecimiento secundario de yacimientos sulfurados y en la formación de yacimientos exóticos. La evaluación de este parámetro es también esencial en la evaluación del riesgo de generación de drenaje ácido desde explotaciones mineras, así como en operaciones de tratamiento metalúrgico y en la estimación del riesgo ambiental que implican los desechos sólidos de las operaciones mineras y metalúrgicas.

PIQUE (POZO): En inglés: *vertical shaft* o *raise*. Es una faena (= labor) minera vertical. En inglés se usa el término *vertical shaft* para un pique (= pozo) excavado desde la superficie, que permite la entrada a la mina subterránea y su ventilación, y *raise*, para la labor vertical interna excavada desde una galería, para unir dos niveles de la mina.

PIRITA (en inglés: *pyrite*): Es un sulfuro de hierro (= fierro) de fórmula  $\text{FeS}_2$  (a diferencia de la pirrotina:  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ). Cristaliza en sistema cúbico, en formas características como el cubo mismo o el pentadodecaedro (*piritoedro*). Es el mineral sulfurado más abundante. Se explotó como mena de azufre para la fabricación de ácido sulfúrico (p.ej. en Rio Tinto; Huelva, España), pero hoy es raramente usado para ese fin. La pirita es un mineral con brillo metálico intenso, de color amarillo pálido, y normalmente bien cristalizado. Su fórmula química expresa una anomalía de sus cristales, puesto que hay átomos de azufre extra en espacios que corresponden a  $\text{Fe}^{2+}$ . Al oxidarse en presencia del agua, forma  $\text{FeSO}_4$  (aporte de  $\text{Fe}^{2+}$ ) y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (aporte de  $\text{H}^+$ ):

- $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$
- $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$

A su vez, la formación de ion férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) contribuye también a la oxidación de la pirita:

- $\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$

Esto de por sí genera fuerte acidez, a la que se une la producida a continuación por la oxidación e hidrólisis del hierro y formación de la goethita:

- $\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}^+$

Este efecto de acidez en el medio favorece la migración de metales en la zona de oxidación de yacimientos de cobre, y por lo tanto, la formación de sulfuros ricos en profundidad (zona de cementación). También posibilita la formación de yacimientos exóticos de cobre, debido al ambiente ácido que genera. Igualmente, es un factor dominante en la producción de drenaje ácido contaminante. Otra forma de  $\text{FeS}_2$ , de baja temperatura, es la marcasita. Ver además: pH.

PIROMETALURGIA (en inglés: *pyrometallurgy*): Conjunto de procedimientos metalúrgicos de liberación y refinación de metales, que implican procesos de elevada temperatura, como la fusión de minerales y el refinado a fuego. El llamado cobre blister es un producto de ambos procesos. El principal problema de la pirometalurgia (utilizada en el tratamiento de concentrados sulfurados de cobre) son sus emisiones aéreas. Estas

incluyen  $\text{SO}_2$  (que en la atmósfera forma ácido sulfúrico, principal responsable de la lluvia ácida) y pueden incluir también  $\text{As}_2\text{O}_3$ , si el concentrado contiene enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ).

**PIRROTINA** (en inglés: *pyrrhotite*): Sulfuro de hierro de fórmula  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$  ( $x = 0$  a  $0.2$ ). Posee cierto grado de magnetismo (débil comparado con el de la magnetita). Su aspecto es metálico, de color amarillo pálido y cristaliza en el sistema monoclinico (variedad pobre en hierro) o hexagonal (variedad rica en hierro), aunque generalmente presenta aspecto masivo. Es un mineral frecuente en yacimientos de tipo skarn de cobre.

**PLACERES** (en inglés: *placers*): Yacimientos secundarios de minerales formados por erosión diferencial o por depositación diferencial (durante el transporte de sedimentos). Los minerales que forman estos yacimientos son resistentes al ataque químico así como a la abrasión, y su alta densidad les permite sedimentar cuando otros minerales son transportados por la corriente. Se distingue los siguientes tipos de placeres:

- Eluviales: el mineral económico permanece en el sitio mientras otros materiales de la roca o sedimento son disueltos o transportados.
- Aluviales: concentraciones en sitios favorables de una cuenca de drenaje donde hay obstáculos, disminución de velocidad de la corriente, efecto de la fuerza centrífuga.
- Litorales: formados por efecto del oleaje y las corrientes marinas.

El oro y los platinoides forman yacimientos tipo placer (aluviales) importantes. Debido, debido a su propiedad de amalgamarse se pueden desarrollar pepitas de oro. También forman placeres la casiterita ( $\text{SnO}_2$ ), los diamantes y muchos minerales no-metálicos, como circón, granate, rutilo, etc. Los placeres auríferos de Chile se explotaron ya en tiempos incaicos y fueron el principal recurso económico que financió la conquista de Chile. En la Región de Coquimbo fueron notablemente importantes los de Andacollo, explotados ya en tiempos pre-hispánicos.

**PLATINOIDES** (en inglés: *platinoids*): Elementos metálicos del Grupo del Platino, como Ir, Rh, Pd y Os. Ver lopolito.

**PLIEGUE** (en inglés: *fold*): Estructura formada por estratos deformados en formas arqueadas, siguiendo la figura de una onda mecánica. Se producen por el efecto de presiones horizontales sobre estratos que se comportan de manera plástica. La parte estructuralmente positiva del pliegue (en arco) se denomina anticlinal y la negativa sinclinal. El plegamiento desarrolla espacios en las zonas axiales anticlinales o sinclinales de los pliegues por diaclasamiento, fracturas que luego pueden albergar

mineralizaciones hidrotermales. La mayor parte de los yacimientos minerales en Chile se encuentra en rocas no plegadas o suavemente plegadas debido al carácter competente de las secuencias volcánicas. En cambio, algunos distritos metalíferos del Perú presentan importante plegamiento, lo que se explica por la mayor participación de rocas sedimentarias de grano fino en sus secuencias estratificadas.

**PLUMA (PENACHO):** En inglés: *plume*. Este término denota una especie de *penacho* de una sustancia fluida que asciende en un medio sólido o fluido. Por ejemplo, la pluma de contaminación de SO<sub>2</sub> emitida por la chimenea de una fundición o la pluma formada por un fluido neumatolítico-hidrotermal que sale desde un magma en cristalización y se moviliza a través de las rocas en las que dicho magma se emplaza. Nota: la traducción de *plume* por pluma no es la más correcta, dado que el término en inglés denota un penacho, constituido por un conjunto de plumas paralelas, cuya forma se asemeja efectivamente a la que adopta el fenómeno en cuestión.

**PLUNGE:** Es un término inglés de amplio uso, que puede ser traducido como buzamiento axial. Se refiere a la dirección, sentido y ángulo de inclinación que presenta un elemento estructural axial. Por ejemplo, la inclinación = buzamiento del eje de un pliegue que indica la vergencia del mismo. También puede aplicarse en el caso de cuerpos mineralizados fusiformes (en forma de huso).

**PLUTÓN:** Cuerpo ígneo emplazado a varios km bajo la superficie. Puede ser un stock, macizo o un batolito. La palabra deriva del nombre del dios de los infiernos conforme a la mitología romana. Según las condiciones de cristalización, la naturaleza de las rocas que corta y las estructuras presentes, un plutón puede dar lugar a distintos tipos de mineralizaciones.

**PODIFORME (en inglés: *podiform*):** La palabra describe un tipo de estructura en que la mineralización se presenta en cuerpos pequeños lenticulares. Se aplica principalmente a yacimientos de cromita en peridotitas, como las de la Cordillera de Nahuelbuta, en el sur de Chile o las de Herbeira en el norte de España. Los cuerpos podiformes aparecen distribuidos al azar, separados entre sí por varios metros, lo cual dificulta la explotación de este tipo de depósito (en comparación con las capas continuas de cromita de los lopolitos).

**POLÍMERO:** Un polímero es una molécula gigante constituida por la repetición indefinida de una molécula simple pequeña. Los hidrocarburos parafínicos son estructuras polimerizadas construidas por la repetición del grupo CH<sub>2</sub>, las que a su vez pueden ser transformados en moléculas gigantes como las de los plásticos. Los silicatos (excepto los

nesosilicatos) son estructuras polimerizadas del grupo  $\text{SiO}_4^{4-}$ , ya sea en cadenas (inosilicatos), planos (filosilicatos) o redes tridimensionales (tectosilicatos). En un magma, los silicatos presentan cierto grado de polimerización, la que es un preludio de su cristalización. El agua contenida por un magma tiene un efecto despolimerizante. En consecuencia tiende a retardar su cristalización.

**POLIMETÁLICO** (en inglés: *polymetallic*): El término designa yacimientos que incluyen diversos metales sulfurados, principalmente Pb (galena) y Zn (blenda = esfalerita). Entre estos están los de Casapalca, Cerro de Pasco, Morococha, Yauricocha, Huaron y San Cristóbal en Perú. Chile es relativamente pobre en esta clase de yacimientos, localizándose la mayoría de ellos en la Región de Aysén (p.ej., Toqui) donde se asocian a una faja Patagónica, que continúa hacia el NNE en Argentina. Ejemplos españoles de yacimientos polimetálicos son los de La Unión y Mazarrón en Murcia, y Reocín en Cantabria.

**PORFÍRICA, PÓRFIDOS** (en inglés: *porphyric, porphyries*): Porfírica es una textura típica de las rocas volcánicas, subvolcánicas o cuerpos hipabisales de ascenso rápido. Se caracteriza por la presencia de cristales de tamaño milimétrico a centimétrico, inmersos en una masa fundamental afanítica o microcristalina. Dicha textura se forma porque el magma experimenta una cristalización inicial en un nivel profundo (durante la cual se forman los cristales mayores), seguida de un rápido ascenso a un nivel más superficial, donde cristaliza la masa fundamental. Se denomina pórfidos a cuerpos de nivel hipabisal tipo stock o macizo, que presentan una masa fundamental microcristalina y cristales mayores de feldespato.

**PÓRFIDOS CUPRÍFEROS** (en inglés: *porphyry copper*): Estos yacimientos están asociados a stocks porfíricos que pueden albergar o no la parte principal de la mineralización. Los pórfidos cupríferos tienen en común una serie de rasgos que incluyen: a) la magnitud de su mineralización (unos cientos a miles de Mt de roca mineralizada); b) su ley primaria relativamente baja (dado el predominio de los sulfuros pirita y calcopirita), la cual se sitúa bajo 1% Cu; c) la presencia de Mo u Au (raramente los dos en contenidos significativos) acompañando los contenidos de Cu; d) la capacidad para formar importantes zonas enriquecidas secundariamente con calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), favorecida por la presencia de pirita y siempre que se den condiciones litológicas, estructurales y climáticas favorables; y e) la distribución en fajas coincidentes con bordes de subducción de placas oceánicas. La subducción puede ocurrir bajo corteza continental (tipo Andino) o bajo corteza oceánica (arcos de islas). En ese ambiente se generan los magmas calcoalcalinos (series con magnetita de Ishihara). Según el tipo de estructura que alberga la mineralización se distinguen dos subtipos:

- Stockwork (redes de finas fracturas mineralizadas) con o sin mineralización diseminada asociada importante.
- Chimenea de brecha (*breccia pipe*), con mineralización en la matriz junto (comúnmente) con turmalina.

La alteración hidrotermal puede disponerse concéntricamente de acuerdo a los modelos de:

- Lowell y Guilbert (de adentro hacia afuera): potásica → filica → argilica → propilítica. Modelo característico de los ambientes de tipo Andino, con intrusiones granodioríticas asociadas.
- Hollister (de adentro hacia afuera): potásica → propilítica. Este modelo es típico de rocas encajadoras máficas, generalmente en contextos tipo arcos de islas, con intrusiones dioríticas asociadas.

Los pórfidos cupríferos de cadenas de tipo Andino encierran las mayores reservas de Cu y Mo del mundo, y existen importantes reservas de oro en los pórfidos cupríferos de los arcos de islas volcánicas (Nueva Guinea, Indonesia, Filipinas, etc.). Los principales pórfidos cupríferos de Chile (cada uno con reservas de miles de Mt de rocas mineralizadas con Cu-Mo) son los de: Collahuasi (Tarapacá), yacimiento complejo que incluye varios tipos estructurales de mineralización; Chuquibambilla (Antofagasta), gran depósito tipo stockwork, cuya zona superior oxidada fue notablemente rica; La Escondida (Antofagasta), caracterizado por la magnitud y ley de su zona de sulfuros secundarios; Los Pelambres (Coquimbo), yacimiento tipo stockwork; Río Blanco-Los Bronces (Valparaíso y Región Metropolitana), donde predomina la mineralización en chimeneas de brecha; y El Teniente (Región del Libertador), gran depósito tipo stockwork, cortado por una chimenea de brecha estéril.

POTASIO-ARGON: Método de datación radiométrica de rocas ígneas que utiliza la conversión del isótopo  $^{40}\text{K}$  en  $^{40}\text{Ar}$  quedando este gas noble atrapado en la red cristalina de los minerales. Es un método de datación de amplio espectro de edades, que puede ser usado desde unos 100.000 años hasta cientos y miles de millones de años. Sin embargo, si la roca experimenta metamorfismo (o sus minerales se alteran) el  $^{40}\text{Ar}$  puede escapar de la roca, en cuyo caso la datación indica la edad del evento metamórfico. Este método ha sido muy utilizado en la datación de pórfidos cupríferos.

POTENCIAL REDOX: Ver Eh.

**POTENCIAL IÓNICO:** Este parámetro indica la relación entre el radio iónico de un elemento y su valencia positiva (vale decir  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{S}^{6+}$ , etc.). Representando los distintos elementos con su respectiva valencia y radio iónico en un diagrama de dos ejes, ellos se agrupan en distintos campos, que se corresponden con sus propiedades químicas en solución: 1. Alto radio iónico, baja valencia (como Na, K, Ca, Mg,  $\text{Fe}^{2+}$ ). Estos iones no se hidrolizan en soluciones acuosas. 2. Radio iónico y valencia intermedios ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ). Estos iones experimentan hidrólisis, precipitando los respectivos hidróxidos. 3. Pequeño radio iónico; alta valencia (como  $\text{C}^{4+}$ ,  $\text{P}^{5+}$  y  $\text{S}^{6+}$ ). No son solubles como iones simples, pero sí como iones complejos con oxígeno:  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

**PRESIÓN HIDROSTÁTICA:** Se denomina presión hidrostática a aquella ejercida por el peso de la columna de agua, suponiendo que ella no está cortada por niveles de rocas impermeables entre la superficie del terreno y el punto considerado.

**PRESIÓN LITOSTÁTICA:** La ejercida por la columna de rocas situada sobre el nivel considerado.

**PRESIÓN SUPRAHIDROSTÁTICA:** Cuando la columna de agua, que se desarrolla a través de las fracturas y espacios interconectados de rocas y sedimentos, es interrumpida por un nivel de rocas impermeables, el agua situada bajo ese nivel se encuentra a una presión intermedia entre la hidrostática y la litostática. Dicha presión recibe el nombre de presión suprahidrostática. Ver además: válvula activada.

**PROCESO:** El concepto de proceso involucra la consideración de las distintas fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial. En el caso de los procesos geológicos, esto implica la consideración de las causas y contextos físicos, químicos y biológicos que intervienen en cada una de esas fases y en la evolución y resultado de los fenómenos geológicos. Ejemplos de procesos geológicos son la formación de una cadena de montañas, el desarrollo de una caldera volcánica, la meteorización de un macizo rocoso, etc. En geología económica revisten especial importancia los procesos metalogénicos, los de enriquecimiento secundario de yacimientos sulfurados, los de generación de aureolas geoquímicas primarias y secundarias, etc.

**PROSPECCIÓN:** Ver exploración minera.

**PROSPECTO** (en inglés: *prospect*): Se denomina así a una zona que presenta un cierto potencia para albergar mineralizaciones de carácter económico cara a su posible explotación. Este potencial puede ser de carácter geológico, mineralógico, geoquímico,

geofísico, etc. El particular o la empresa que han reconocido el prospecto como tal pueden o no haber realizado trincheras de exploración (= calicatas) o sondajes (= sondeos), pero seguramente han invertido en el estudio de su geología y mineralogía y realizado muestreos geoquímicos preliminares (p.ej., geoquímica de suelos). Es posible que pretendan venderlo en esa etapa (tal vez reteniendo un porcentaje de su propiedad) o bien busquen asociarse para avanzar en su estudio. Según la información presentada y las características geológicas del sitio, un prospecto puede venderse por unos miles hasta cientos de miles de dólares-euros. Si cuenta con labores de reconocimiento o sondajes (= sondeos) positivos, ese valor puede subir hasta algunos millones de dólares. Al respecto, cuando se produjo la *fiebre del oro* generada por el descubrimiento de El Indio (Región de Coquimbo, Chile) un prospecto en la faja de interés llegó a venderse sin sondajes en 20 millones de dólares, pero fue un caso muy raro y el comprador no tuvo éxito en su apuesta.

**PROVINCIAS METALOGÉNICAS** (en inglés: *metalogenic provinces*): Son áreas geográficas, generalmente en forma de fajas, que pueden alcanzar extensiones de hasta nivel sub-continental. Se caracterizan por la presencia de yacimientos recurrentes de uno o varios metales asociados. Por ejemplo, en la región Andina de Sudamérica, se distinguen de W a E las siguientes provincias metalogénicas:

- Ferrífera: norte de Chile y sur de Perú.
- Cuprífera-aurífera: toda la Cadena Andina, con un máximo en el norte de Chile y en Perú.
- Polimetálica: principalmente en Perú.
- Estannífera: con W o Ag, en Bolivia.

**PROXIMAL**: Denominación relacionada con los yacimientos tipo sulfuros macizos (= masivos) de asociación volcánica depositados en el fondo oceánico. El término alude a su proximidad relativa a la fuente de la mineralización. La denominación opuesta es distal, que indica su mayor lejanía respecto a ella. La presencia de rasgos magmáticos y de minerales de mayor temperatura, son criterios que indican el carácter proximal de un yacimiento. Ver además: distal.

**PULL-APART**: Cuencas estructurales descomprimidas por efecto de la intersección y desplazamiento de fallas de desgarre (= rumbo), cuya geometría da lugar a condiciones locales extensionales y por lo tanto, subsidencia. La presencia de estas condiciones estructurales facilita también el emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos.

## Q

**QUERATOFIROS:** Son rocas volcánicas alteradas de composición intermedia y de aspecto córneo (= corneano), emplazadas en medios subacuáticos, y que presentan enriquecimientos metasomáticos en sodio. Pueden ser considerados análogos de las espilitas, aunque de litología intermedia y de ambiente marino de plataforma. En Chile son frecuentes en las secuencias volcano-sedimentarias del Cretácico inferior.

## R

**RECURSOS:** Es toda concentración natural de un sólido, líquido, o gas en la corteza terrestre, y cuya extracción es actual o potencialmente factible. En su aplicación minera (ambigua muchas veces), el término alude a estimaciones del probable volumen que alcanzan las rocas mineralizadas por uno o más metales en un distrito o yacimiento. Dicha estimación incluye recursos subeconómicos y está basada en inferencias geológicas. Las estimaciones de recursos son útiles cuando se va a comprar o vender una propiedad minera o una mina en explotación, así como cuando se planifica una nueva operación minera. Al respecto, hay que considerar el hecho de que en el caso de grandes yacimientos sería un error económico serio el realizar al principio todos los sondajes (= sondeos) necesarios para determinar sus reservas. Ello sería innecesario y demandaría una enorme inversión que representaría un capital inmovilizado. En consecuencia, se miden las reservas requeridas para sustentar un determinado proyecto de explotación y se continúa con la operación de agregar nuevas reservas a medida que avanza la explotación o se plantea la posibilidad de expandir el proyecto. Sin embargo, es conveniente contar en todo momento con una estimación de los recursos, para pensar en el largo plazo o hacer frente a situaciones coyunturales (por ejemplo: una oferta de otra empresa para una asociación o compra).

**RESERVAS** (en inglés *reserves*): Son los tonelajes medidos de rocas mineralizadas con indicación de sus leyes, presentes en un yacimiento o distrito. En términos de su factibilidad económica de explotación se clasifican en económicas y marginales. Si son sub-económicas, se las denomina recursos (en vez de reservas). Las reservas económicas se pueden clasificar en:

- **Medidas (= probadas)** Se denomina reservas medidas a aquellas calculadas sobre la base de un número suficiente de muestras, separadas entre sí por una

distancia igual o menor a la del alcance (ver Geoestadística). En su concepto más clásico, se habla de mineral medido cuando disponemos de una información directa tomada de un muestreo detallado de trincheras (calicatas), labores, sondeos (= sondajes). El tonelaje real no puede diferir en más de un 15 % con respecto al calculado.

- **Indicadas (= probables):** Se denomina reservas indicadas de minerales de un yacimiento a aquellas cuyo cálculo está basado en un número suficiente de muestras, pero éstas están espaciadas a una distancia mayor que el alcance estimado (ver Geoestadística). Las cifras de las reservas indicadas se calculan como proyecciones razonables considerando la incertidumbre implicada por el mayor espaciamiento de las muestras.
- **Inferidas (= posibles):** Las reservas inferidas corresponden a cifras estimadas sobre la base del conocimiento geológico del yacimiento. Por ejemplo, si se constata la asociación de la mineralización de cobre con una zona de alteración de albita-clorita, se podría inferir que la mineralización continúa en zonas con la misma alteración, aunque carezcan de muestreo de leyes. Naturalmente, el acierto de estas estimaciones dependerá de la regularidad de la asociación entre la mineralización y los rasgos litológicos y estructurales del depósito, así como de la experiencia y criterio del profesional responsable.

**RESURGENTE:** Se denomina así a una caldera volcánica en cuyo interior se ha emplazado un nuevo magma a cierta profundidad, lo cual genera un ligero *doming* o arqueamiento interno. Las calderas resurgentes son sitios propicios para el emplazamiento de yacimientos epitermales de metales preciosos.

**REVELADORES:** En la terminología propuesta por P. Routhier, son factores geológicos como el emplazamiento de magmas intrusivos o el desarrollo de fallas que permiten la expresión del potencial de un dominio metalogénico en términos de la formación de yacimientos.

**RIFT:** Valle alargado de origen tectónico, que puede representar la etapa inicial en la formación de una nueva dorsal oceánica. Por ejemplo, el Rift de Africa. Es común que la formación de un rift vaya acompañada de la extrusión de magmas alcalinos.

**ROCA ALMACENADORA:** En geología del petróleo, es la roca porosa y permeable que alberga los depósitos de hidrocarburos líquidos o gaseosos.

**ROCAS CORNEANAS (CÓRNEAS):** En inglés: *hornfels*. Término aplicado a las rocas de la aureola de metamorfismo de contacto producido por un cuerpo magmático de

considerable magnitud, que intruye a una secuencia de rocas estratificadas. Las rocas metamorfozadas reciben también el nombre de rocas corneanas (= córneas). Los depósitos tipo skarn se sitúan en este contexto.

**ROCAS ENCAJADORAS** (en inglés: *host rocks*): Son las rocas que albergan la mineralización de un yacimiento.

**ROCA MADRE:** En geología del petróleo es la roca generalmente formada en una plataforma marina de carácter pelítico y reductor cuya etapa sedimentaria-diagenética dio lugar a la evolución de la materia orgánica a petróleo. Dicha evolución fue seguida por la posterior migración de los hidrocarburos hasta su emplazamiento en las rocas almacenadoras.

## S

**SALBANDA** (en inglés: *gouge*): Es el material fracturado presente en una falla. Incluye desde fragmentos mayores hasta fino material molido que presenta un aspecto lodoso (= gredoso) si hay agua presente. En inglés el término *fault gouge* (= harina de falla) hace mención al material fino que se encuentra en las zonas de falla.

**SALMUERA** (en inglés: *brine*): Solución muy salina, que contiene principalmente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Las salmueras pueden tener variados orígenes: a) producto de la evaporación de cuerpos de agua dulce o de mar; b) a partir de la evolución de aguas *connatas* presentes en sedimentos en proceso de diagénesis; y c) de la cristalización de magmas, seguida de fenómenos de ebullición, etc. Las salmueras tienen especial interés en geología económica por dos razones principales. Una de ellas es su contenido en elementos valiosos. Por ejemplo, las salmueras del Salar de Atacama (norte de Chile) son fuente de potasio y de litio entre otros productos. Además son precursoras de yacimientos salinos. La segunda razón es su capacidad para disolver y transportar metales en forma de iones complejos, principalmente de tipo clorurado que desempeñan un papel importante en la formación de algunos tipos de yacimientos metalíferos de origen diagenético (p.ej., MVT de Pb-Zn), así como en la de aquellos directamente relacionados con la cristalización magmática en la etapa hidrotermal (p.ej., pórfidos cupríferos), como muestran las inclusiones fluidas de alta salinidad encontradas en estos yacimientos.

SEDEX: El término constituye una combinación de los términos sedimentario y exhalativo. El término denomina los yacimientos emplazados en secuencias sedimentarias en cuya formación participaron soluciones hidrotermales de origen diagenético o relacionadas con manifestaciones ígneas. Los yacimientos de este tipo son característicos de ambiente de plataforma (marino-continental) y presentan carácter polimetálico, con Pb-Zn como metales principales.

SENSORES REMOTOS (en inglés: *remote sensing*): Conjunto de metodologías de exploración (imágenes satelitales, geofísica aeroportada, espectrografía infrarroja, etc.) utilizadas en exploración minera, que tienen en común la obtención de información a distancia del sitio estudiado (cientos de m a cientos de km). Una de las aplicaciones más importantes de la teledetección en el campo de la geología es el análisis de las regiones del espectro correspondientes al infrarrojo de onda corta (SWIR: *Short Wave Infrared*) y el infrarrojo térmico (TIR: *Thermal Infrared*). Estas técnicas permiten cartografiar zonas de alteración hidrotermal. Los sensores pueden estar montados en un satélite (p.ej., sistema ASTER en el satélite Terra: cooperación entre USA y Japón) o en aviones (sistema AVIRIS). Con la aparición de ASTER: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* la utilización de los sensores de la serie LANDSAT en estudios de caracterización litológica quedó relegada a un segundo plano. La razón es que tanto TM como ETM+ no cuentan con la necesaria resolución espectral como para poder distinguir compuestos mineralógicos importantes. Por su parte el sistema AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*) se monta en aviones y es un concepto desarrollado por el *Jet Propulsion Laboratory* (NASA). El equivalente europeo es HyMap, de origen alemán. Aparte de la exploración minera, estos sensores permiten estudiar la mineralogía de zonas contaminadas por la actividad minera en estudios ambientales.

SERICITA: Muscovita (= moscovita), mica blanca en finos cristales que se produce principalmente por alteración de feldespatos. Es un mineral principal de la alteración cuarzo-sericítica de la zona fílica de los pórfidos cupríferos y es especialmente abundante, junto con turmalina en aquellos de tipo chimenea de brecha. Se distingue por el carácter sedoso que presenta la roca alterada (si se la frota con la mano, se observa en ella el brillo de los finos cristales de sericita). Ver además: alteración fílica y pórfidos cupríferos.

SERIES MAGMÁTICAS: Ver oxidación (series de rocas ígneas con magnetita y series con ilmenita).

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería del Estado de Chile. Es responsable de la elaboración de la Carta Geológica de Chile. Además elabora otras

cartas temáticas y realiza estudios en diversos campos de la geología y la geología aplicada, incluida la volcanología. En aspectos mineros, tiene a su cargo el registro de la propiedad minera del país, así como la seguridad de las operaciones mineras, incluidos los aspectos comprendidos en el cierre de explotaciones mineras. Ver además: IGME.

**SIDERÓFILOS:** El término designa aquellos elementos que presentan afinidad geoquímica con el Fe, como V, Ti, Ni, Co, etc.

**SILICIFICACIÓN:** Alteración hidrotermal consistente en la adición de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) a una roca. La sílice es un componente común de las soluciones hidrotermales. En su mayor parte se origina en la destrucción total de los silicatos por efecto de la acidez, por ejemplo:  $\text{MgSiO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$ . La solubilidad de la sílice se facilita si el pH es alcalino:  $\text{SiO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HSiO}_3^-$ . También se incrementa con la temperatura. El proceso de silicificación de una roca aumenta su dureza y resistencia a los esfuerzos, a diferencia de otras formas de alteración que tienden a debilitarlas.

**SINGENÉTICA** (en inglés: *syngenetic*). Se dice de una mineralización cuya depósito es contemporáneo con la formación de la roca que la alberga. El término se opone a epigenética (la mineralización es claramente tardía respecto a la formación de la roca). Una situación intermedia es la de una mineralización diagenética en rocas sedimentarias, que es posterior a la sedimentación misma, pero acompaña al proceso de litificación de la roca encajadora.

**SIGMOIDE:** Plano de falla o veta en forma similar a una letra S. Cuando la estructura se cierra, se denomina lazo sigmoide. También se suele escribir cimoide (lo que es menos correcto). Las estructuras sigmoides son características de la cizalla simple, vale decir, del efecto de corte de una pareja de fuerzas. Las condiciones internas dentro del lazo sigmoide pueden ser extensionales o compresionales dependiendo del sentido de movimiento en la falla principal.

**SÍNTER:** Depósito hidrotermal superficial constituido por sílice y/o carbonatos. La precipitación de estos minerales forma costras superficiales en sistemas tipo campo geotérmico al evaporarse y enfriarse el agua que contiene la sílice y el carbonato. La roca denominada andacollita (definida en Andacollo, Chile) es propiamente un sinter carbonatado.

**SISTEMA:** En geología designa un conjunto de procesos relacionados entre sí que tienen por consecuencia un determinado tipo de resultado. Por ejemplo, un sistema epitermal incluye: a) una fuente térmica poco profunda; b) la interacción de soluciones

hipógenas (= hipogénicas) con aguas subterráneas profundas; c) el flujo de soluciones hidrotermales a través de redes de fracturas movidas por el desarrollo de celdas convectivas; y d) el transporte y depósito de metales preciosos (Au, Ag). Su resultado es la formación del yacimiento epitermal.

SKARN: Yacimientos metalíferos (Fe, Cu, Au, Zn, W, etc.) formados en la aureola de contacto de secuencias pelítico-carbonatadas y volcánicas, intruidas por granitoides. Más propiamente, designa su ganga constituida por granate, piroxeno y anfíbola. Ver además: granate, metamorfismo y metasomatismo.

SOLUCIÓN HIDROTERMAL (en inglés: *hydrothermal solution*): Solución acuosa caliente natural de cualquier origen. Una solución hidrotermal tiene una capacidad especial para transportar metales en forma de iones complejos, los que deposita cuando sufre un desequilibrio físico (cambios en T o P) o químico. Ver además: hidrotermal.

SONDAJES (SONDEOS): En inglés: *drill holes*. Los sondajes (= sondeos) se realizan para descubrir y reconocer la magnitud y leyes de un cuerpo mineralizado. Los sondajes pueden ser realizados en conjunto con otras labores de exploración o desarrollo (túneles, piques = pozos). Existen diversos tipos de sondajes:

- Con recuperación de testigo (*core*): DDH = *Diamond Drill Hole*. Son caros, pero al disponer de un testigo de roca, se puede obtener gran información geológica, mineralógica, geotécnica (RQD, FF), y por supuesto de leyes de mineral.
- Sin recuperación de testigo: 1) DTH = *Down the Hole* = percusión-rotación, donde se recupera una arenilla (*cutting*). 2: Aire reverso, similar al DTH pero con menor contaminación de materiales. La información geológica que se obtiene es muy limitada, aunque se pueden determinar las leyes de mineral y realizarse un estudio mineralógico preliminar.

Los testigos (*cores*) deben ser objeto de cuidadoso estudio, indicando con la mayor precisión posible su ubicación, orientación y metraje correspondiente al segmento estudiado. La descripción del sondaje (mapeo = testificación) incluye su litología, mineralogía, alteración hidrotermal o supérgena (= supergénica), y fracturas y vetillas presentes. Normalmente, los sondajes en roca mineralizada se cortan en dos a lo largo de su eje. Una mitad se guarda en cajas especiales y la otra es enviada al laboratorio para análisis químicos.

STOCK: Ver macizo.

**STOCKWORK:** Se denomina así a un enrejado de fracturas que se expresan a distintas escalas, desde el nivel métrico al microscópico, y que pueden albergar la mineralización principal de un yacimiento metalífero. Uno de los dos tipos estructurales de pórfidos cupríferos se denomina stockwork por su relación con estas estructuras (el otro es el denominado chimenea a brecha = *breccia pipe*). El stockwork se puede desarrollar tanto en el intrusivo como en la roca cortada por éste. En su origen pueden participar factores tectónicos, como la intersección de sistemas de fallas, así como el efecto explosivo generado por la descompresión de fluidos supercríticos. Los stockworks se pueden encontrar además en yacimientos epitermales de Pb-Zn-(Ag) (p.ej., distrito de Mazarrón, España) o en sulfuros macizos (= masivos) (p.ej., Río Tinto, España). Ver además: pórfidos cupríferos, sulfuros macizos.

**SUBDUCCIÓN:** Proceso de introducción de una placa litosférica oceánica bajo el manto litosférico continental (p.ej., Cadena Andina) o bajo el manto litosférico oceánico (arcos de islas). El ángulo del plano de subducción se puede conocer porque constituye una zona sísmica (ver zona de Wadati-Benioff). Su inclinación está relacionada en parte con la velocidad de convergencia de las placas (inversamente proporcional). También influyen en la inclinación otros factores, como perturbaciones debidas a la topografía de la placa subductada y la edad de la placa. Una placa joven y caliente presenta mayor flotabilidad (*buoyancy*) y subduce a menor ángulo. Los procesos de subducción desempeñan un papel principal en la generación de los magmas que dan origen a importantes tipos de yacimientos metalíferos, como los pórfidos cupríferos, los depósitos epitermales y los de hierro tipo Kiruna (p.ej., Faja Ferrífera del Norte de Chile). Esto ocurre tanto en los márgenes continentales de tipo Andino como en los arcos de islas oceánicos.

**SUBSIDENCIA:** Proceso de hundimiento superficial o bien de un bloque geológico. Tiene su origen en la pérdida de apoyo vertical (por ejemplo, un proceso karstico) o en la pérdida de presión lateral (que afecta el comportamiento de las fallas presentes). Labores mineras subterráneas poco profundas (como en Portovelo-Zaruma, Ecuador) pueden ser causa de subsidencia. También es normal el desarrollo de cráteres de subsidencia en las explotaciones subterráneas por hundimiento de bloques (*block caving*), como los formados en El Salvador, Río Blanco y El Teniente (Chile).

**SUBVOLCÁNICO:** Emplazamiento de un cuerpo magmático entre el nivel volcánico y el hipabisal. Por ejemplo, los intrusivos asociados a los yacimientos de Sn-Ag de la parte central-sur de la faja estannífera de Bolivia se emplazaron en un nivel subvolcánico. Este nivel se sitúa en torno a 1.0 – 1.5 km de profundidad. El término también puede aplicarse

a domos de emplazamiento muy somero, como los que dieron origen a yacimientos epitermales de Pb-Zn-(Ag) en los distritos de La Unión y Mazarrón (España).

**SULFÓFILO:** El término designa a los elementos que poseen afinidad por el azufre y por lo tanto están presentes en las paragénesis hidrotermales sulfuradas o se asocian al azufre en otros ambientes naturales (p.ej., piritas framboidales de medios acuosos reductores). También se usa el término calcófilo, pero este significa, etimológicamente: afinidad por el cobre, de ahí que sea menos apropiado. Entre los elementos que presentan mayor afinidad por el azufre están Mo, Cu, Ni, Co, Fe, Zn, Pb, Sb y Ag. La metalogénesis asociada al magmatismo calcoalcalino es esencialmente sulfófila.

**SULFUROS MACIZOS (MASIVOS):** En inglés: *massive sulfides*. Es un término muy amplio, que incluye distintos tipos de depósitos asociados a diferentes ambientes tectónicos (dorsales oceánicas, plataforma marina continental, cuenca tras arco, actividad volcánica tipo caldera en el fondo oceánico, etc). Incluye tipos de yacimientos como los Sedex, Besshi, Kuroko, Chipre, etc. Estos tipos de yacimientos tienen en común su depósito cercano al nivel del fondo marino, el carácter masivo de la mineralización, la presencia en grados variables de sedimentos marinos, y la actividad hidrotermal exhalativa. Ver además: Besshi, Chipre, Kuroko, Sedex.

**SUPERCRÍTICO:** El equilibrio agua líquida-vapor está determinado por la relación temperatura-presión. Esto implica que puede existir agua en estado líquido a temperaturas muy por encima de la temperatura de ebullición del agua a nivel del mar (100°C) si la presión es mayor a 1 atmósfera. Sin embargo, lo señalado tiene un límite. Así, ese equilibrio se extiende hasta los 374°C, donde a 218 atmósferas aun puede existir agua líquida. Sobre esa temperatura se extiende un campo denominado supercrítico, donde a presiones elevadas el agua se presenta en forma de un fluido cuya densidad puede alcanzar una cifra en torno a 0.8, pero que ya no es agua líquida propiamente tal. Si la presión que permite la existencia de este fluido supercrítico disminuye bruscamente, el fluido pasa a gas de manera explosiva. Esto se debe a que el vapor de agua ocupa un volumen que es unas 1000 veces superior al ocupado por el agua líquida. Fenómenos explosivos de esta naturaleza pueden dar lugar a la formación de stockworks y cuerpos de brecha, tanto en estructuras cilíndricas como en cuerpos filonianos.

**SUPÉRGENO (SUPERGÉNICO):** Proveniente de la superficie. Por ejemplo, cuando la oxidación en superficie y hasta el nivel freático causa la lixiviación del cobre de un yacimiento y forma un horizonte profundo en el que está más concentrado (bajo el nivel freático), el fenómeno se califica como de enriquecimiento supérgeno (= supergénico =

enriquecimiento secundario). El término se contrapone a hipógeno (= hipogénico). Ver además: hipógeno.

## T

**TAQUILITA:** Vidrio volcánico generalmente de composición muy rica en sílice. Se denomina pseudotaquilita al material vítreo que puede formarse en una zona de falla debido al efecto de la fricción producida por el movimiento de los bloques, la cual puede generar temperaturas capaces de fundir el material fino presente.

**TECTÓNICA:** Es el estudio de los procesos de deformación de la corteza terrestre que actúan a gran escala, como el desarrollo de cinturones orogénicos, fallas mayores, movimientos de placas litosféricas y sus consecuencias, emplazamiento de cuerpos batolíticos, etc.

**TECTÓNICA DE PLACAS:** Teoría geológica que explica el funcionamiento tectónico global de la Tierra, así como su historia geológica, sobre la base de la formación, desplazamiento y destrucción de placas rígidas. Estas placas, constituidas por litosfera (manto rígido) y corteza continental (placas continentales) u oceánica (placas oceánicas), se desplazan sobre un manto de menor rigidez (manto astenosférico). El movimiento de las placas se atribuye a las corrientes de convección que operan en el manto astenosférico, que movilizan materia y energía térmica entre el núcleo externo y el manto litosférico. Las placas oceánicas nacen en las dorsales oceánicas y se destruyen en las zonas de subducción. Esta teoría permite explicar la deriva continental y está sustentada en evidencias físicas, como las bandas de inversiones paleomagnéticas del fondo oceánico y la actividad sísmica en los bordes de placa. También se ha comprobado experimentalmente el desplazamiento de islas oceánicas y continentes mediante geodesia satelital (GPS). Por otra parte, la misma teoría permite explicar la generación de magmatismo en diversos ambientes tectónicos, así como la distribución mundial de los yacimientos minerales, y entrega una explicación consistente de la historia geológica de la Tierra. La tectónica de placas surgió en la década de los años 1960's y en su desarrollo fue esencial el estudio geofísico de los fondos oceánicos y su interpretación sobre la base del registro estratigráfico de las inversiones de polaridad del campo magnético terrestre, elaborado en años anteriores (el que permitió traducir la información paleomagnética binaria en términos de tiempo transcurrido).

**TERMODINÁMICA:** Es la ciencia que estudia los sistemas en términos de los intercambios de energía y materia. Desempeña un papel muy importante en el estudio de los sistemas geológicos y sus procesos ya que define sus condiciones de equilibrio. En lo referente a procesos que incluyen reacciones químicas (como la formación de minerales, las interacciones agua-roca-gas, etc.) la termodinámica permite evaluar el grado de desequilibrio de un sistema, pero no el tiempo que demorará en alcanzar el equilibrio respectivo. En ese aspecto debe complementarse con la cinética química. Un parámetro termodinámico de especial utilidad es la energía libre asociada a una reacción química determinada, e indica en qué medida la reacción ocurrirá espontáneamente y entregará energía (reacciones exotérmicas) o requerirá energía para ocurrir (reacciones endotérmicas). Los diagramas Eh-pH son un instrumento termodinámico de gran aplicación en geoquímica y en el estudio de procesos hidrotermales y supérgenos (= supergénicos), así como en hidrometalurgia. Ver además: energía libre.

**TEORÍA:** Es una explicación científica de rango mayor al de la hipótesis, aplicada a una parte muy importante del campo de una ciencia. Puede incluir una serie de leyes (que son explicadas por la teoría) así como varias hipótesis sobre las que se apoya. Ejemplos: teoría de la evolución biológica; teoría de la tectónica de placas. En materia de depósitos minerales, las principales teorías conciernen a su origen, como la teoría hidrotermal. Un campo de larga discusión ha sido la importancia relativa de los procesos magmáticos y de la sedimentación marina en la formación de yacimientos, discusión que reprodujo en parte la del plutonismo-neptunismo relativa al origen de las rocas. Esta discusión ha sido superada en buena parte, debido a las perspectivas aportadas por la tectónica de placas, a la mejor comprensión del efecto de los procesos diagenéticos y al conocimiento obtenido respecto al papel de las salmueras metalíferas y de los sistemas hidrotermales en campos geotérmicos.

**TERRAZA:** Es el remanente de un plano de erosión y depósito (p.ej., el plano de inundación de un río, una plataforma de abrasión marina, etc.), una vez que se ha producido un ascenso del bloque respectivo y su parcial erosión. Las terrazas pueden contener concentraciones metálicas tipo placer, formadas en el antiguo plano de erosión-depositación.

**TERRENO** (del inglés: *terrane*): En términos tectónicos, se llama así a un bloque de corteza, limitado por fallas, cuya historia geológica es distinta de la de otros bloques adyacentes. Un uso coloquial del término terreno (en Chile) es el de campo. Por ejemplo, una *salida al terreno*, es una excursión geológica.

**TESTIGO** (en inglés: *drill core*): Se denomina así al cilindro más o menos continuo de roca que se obtiene de una perforación realizada con una corona de acero con diamantes industriales incrustados. La herramienta tiene una apertura central, en la que va quedando encajada la roca cortada por la corona. La corona a su vez se encuentra ligada a un sistema de tubos. La maquinaria de perforación induce dos tipos de movimiento: hacia abajo y rotacional, para producir el corte de la roca e introducirlo en la tubería. Para recuperar el testigo, hay que extraer toda la tubería, operación que se realiza sistemáticamente cada tantos metros. Ver además: sondajes (= sondeos).

**TEXTURA** (en inglés: *texture*): La textura de una roca o minerales está configurada por rasgos estructurales finos, incluidos los relativos al crecimiento cristalino. Por ejemplo: textura sacaroidal de una roca microcristalina, textura coloforme de los minerales de una mena. También un enrejado fino de vetillas constituye un rasgo textural. De especial importancia en términos del tratamiento metalúrgico de minerales sulfurados son aquellas relaciones texturales como el entrecrecimiento de minerales, que pueden dificultar mucho su separación en el proceso de molienda.

**TIERRAS RARAS** (en inglés: *rare earth elements = REE*): Es un grupo de elementos químicos cuyo número atómico está comprendido entre 58 (Lantano) y 71 (Lutecio): La, Ac, Ce, Pr, Na, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. Su característica distintiva es que al aumentar el número atómico en 1, el electrón adicional correspondiente es agregado a un nivel electrónico interno (y no al último orbital). En consecuencia, entre dos elementos contiguos no existen mayores diferencias químicas (las cuales dependen de los orbitales electrónicos externos que determinan la valencia). Como tampoco hay diferencias físicas significativas (puesto que la diferencia de masa es sólo 1), estos elementos son muy difíciles de separar entre sí. Actualmente estos elementos (REE) tienen importantes aplicaciones tecnológicas. Su fuente principal son los fosfatos como la monacita → (Ce,La,Nd,Th)PO<sub>4</sub> (abundante en Brasil). También alcanzan contenidos importantes en la mena de yacimientos IOCG como Olympic Dam (Australia). En Chile se ha considerado la posibilidad de obtenerlos de apatita (= apatito), mineral que acompaña la mineralización en yacimientos de la Faja Cretácica Ferrífera. Sin embargo, su contenido de REE es relativamente bajo. Esto se explica por la asociación de los REE con el magmatismo alcalino mientras que en Chile predomina el de tipo calcoalcalino.

**TOBA** (en inglés: *tuff*): Roca piroclástica formada por la litificación de ceniza volcánica.

**TRANSPRESIÓN Y TRANSTENSIÓN**: Ambos términos se refieren a situaciones generadas a lo largo de grandes fallas, donde su curvatura induce condiciones locales de presión o tensión. En el territorio chileno se generaron condiciones tectónicas de estos

tipos durante el período Cretácico, las cuales controlaron el emplazamiento de cuerpos magmáticos asociados a yacimientos de Fe tipo Kiruna (faja ferrífera cretácica), de vetas (= filones) de Cu-Fe-Au, y de yacimientos tipo skarn de los mismos metales.

TRAS ARCO (en inglés: *back arc*): El término designa una cuenca situada entre el arco magmático, producto de subducción de placa oceánica, y una zona continental estable (antepaís). La cuenca tras arco se forma por efecto de condiciones extensionales, que generan un régimen subsidente y pueden dar lugar al ingreso del mar el que puede alcanzar profundidades someras o mayores. Este fue el caso de la Cuenca de Huarmey, en Perú, que se desarrolló y profundizó en el Cretácico Inferior, mientras más al sur existía sólo una cuenca somera. Distintos tipos de yacimiento pueden formarse en este tipo de cuencas.

TRAZAS (en inglés: *trace elements*): Se denomina elementos en trazas a aquellos presentes en las rocas en concentraciones inferiores a 0.1%. Tienen aplicaciones importantes en estudios petrológicos y metalogénicos, así como en prospección geoquímica.

TUBO DE CORRIENTE: Modelo metalogénico general propuesto por H. Pelissonnier, que analiza la formación de yacimientos minerales en término de un gran volumen de rocas o sedimentos desde el cual los metales son extraídos y transportados por el efecto de fluidos, a través de mecanismos químicos físicos-químicos o físicos. Posteriormente son depositados al estrecharse el *tubo de corriente* por el cual circulan. Dicho estrechamiento puede ser igualmente de carácter químico, físicoquímico o físico. Más allá, el fluido transportador sigue su curso, ahora a través de otro volumen amplio, desarrollando anomalías geoquímicas *de fuga* o pequeños depósitos con el resto de minerales no depositados.

TURMALINA: Ciclosilicato rico en boro que cristaliza en el sistema hexagonal. Este mineral es típico de las mineralizaciones ricas en fluidos neumatolíticos o hidrotermales de alta temperatura. Es además común en yacimientos cupríferos del tipo chimenea de brecha, donde acompaña a sericita y sílice secundaria. Su fórmula general es:  $AD_3G_6(BO_3)_3[T_6O_{18}]Y_3Z$  donde A = Ca, Na, K, D = Al, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Li, Mg, Mn<sup>2+</sup>, G = Al, Cr<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, V<sup>3+</sup>, T = Si, Y = O y/o OH, y Z = F, O y/o OH.

## U

**ULTRAMÁFICAS:** Rocas como las peridotitas, constituidas por olivino y piroxeno, cuya composición es similar a la del manto de la Tierra y tienen su origen en materiales procedentes de ese nivel. A estas rocas se asocian yacimientos podiformes de cromita. Ver además: podiforme.

## V

**VÁLVULA ACTIVADA:** Cuando hay cuerpos de agua subterránea separados por niveles impermeables, el cuerpo inferior puede estar sometido a una presión suprahidrostática, muy superior a la presión hidrostática existente en el cuerpo superior libre. Si el nivel impermeable se rompe (por efecto de la reactivación de una falla: sismo), el agua asciende violentamente debido a la diferencia de presiones existente. Este proceso puede dar lugar al depósito de minerales hidrotermales si las soluciones afectadas contienen iones metálicos complejos, dado el desequilibrio que implica el ascenso violento descrito.

**VETA (FILÓN):** Ver filón.

**VOLCÁN:** Estructura en forma de cono o domo, producto de la extrusión de lava o de material piroclástico. Se clasifican en volcanes escudo (de gran diámetro respecto a su altura, constituidos por lavas fluidas de composición basáltica), estratovolcanes (integrados por estratos de lava y estratos piroclásticos alternados), hornitos (formados sólo por piroclastos), y domos (formados por lavas viscosas, ricas en sílice). En términos de formación de yacimientos metalíferos, presenta especial interés la actividad volcánica correspondiente a los estratovolcanes y domos pliocenos o más antiguos. Desde el punto de vista de los riesgos naturales, ambas formas son notablemente peligrosas en el caso de volcanes activos, por el riesgo de ocurrencia de flujos piroclásticos (riesgo presente en el caso del volcán Chaitén, Chile).

**VOLCANOGÉNICO** (en inglés: *volcanogenic*): Se denomina así a yacimientos de origen fumarólico o hidrotermal, formados a poca profundidad y en asociación a la actividad volcánica subaérea o submarina. Ver además: sulfuros macizos (= masivos).

## W

WAD: Material constituido principalmente por  $MnO_2$ . El dióxido de Mn se forma por oxidación de  $Mn^{2+}$  a  $Mn^{4+}$ , seguida de la hidrólisis y precipitación de este último en forma de dióxido. El wad tiene un carácter coloidal y una notable capacidad para captar metales como Cu, Ni, etc. (de ahí el interés que presentan los nódulos de  $MnO_2$  del fondo oceánico). En yacimientos exóticos de cobre el wad capta altos contenidos del metal, formando el denominado *copper wad*, así como un material de aspecto algo diferente (*copper pitch*). El wad tiene amplia distribución, dado que el Mn es un elemento menor de las rocas y el Mn se oxida rápidamente a la forma  $MnO_2$ , una vez que es extraído de las rocas por efecto de la meteorización. En la provincia de Ciudad Real (España) existen yacimientos epitermales de Mn con importantes contenidos en Co y Ni. Ver además: nódulos

## X

XENOLITO (GABARRO): Fragmento de roca de distinta composición presente en la masa de un cuerpo de roca intrusiva. Corresponden a restos no asimilados de rocas incorporadas durante el ascenso del magma. Si su composición (aunque no necesariamente su textura) es similar a la del intrusivo, se denominan autolitos.

XENOTERMALES: Término utilizado para yacimientos hidrotermales para los cuales se supone una fuente ígnea aunque no existan evidencias de magmatismo en la geología local. Es un concepto antiguo, en la práctica sobrepasado por los conocimientos actuales que implican múltiples orígenes para las soluciones hidrotermales, incluidas las salmueras metalíferas.

## Y

YACIMIENTO MINERAL (DEPÓSITO MINERAL): Se denomina así a una concentración natural de minerales que presenta razonables posibilidades de ser explotada con provecho económico, ya sea en el presente o en un futuro relativamente cercano. Ver además: recursos, reservas.

## Z

**ZEOLITAS** (en inglés: *zeolites*): Son tectosilicatos caracterizados por redes estructurales muy abiertas, con grandes espacios de interconexión, en los que se alojan moléculas de agua y cationes. Puesto que ello permite a los cationes una elevada movilidad, pueden ser fácilmente intercambiados con los del medio externo. Entre sus principales aplicaciones industriales está la de actuar como tamices moleculares en el tratamiento de líquidos y gases, así como en el campo de la catálisis. En Chile no se cuenta con yacimientos de estos minerales, pero las zeolitas se presentan en muchos distritos metalíferos (como Talcuna, en la Región de Coquimbo), así como en secuencias de rocas volcánicas alteradas.

**ZONA DE CEMENTACIÓN (= ENRIQUECIMIENTO SECUNDARIO)**: Es la zona de formación de sulfuros secundarios enriquecidos en yacimientos de cobre, donde calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) se forma por reemplazo del Fe de otros sulfuros por Cu, procedente de la zona de oxidación. El límite entre ambas zonas está dado por el nivel freático (de aguas subterráneas) local. Ver además: oxidación.

**ZONA OXIDADA**: Es la zona superior de un yacimiento de cobre aflorante o sub-aflorante, situada sobre el nivel freático, en la cual el agua meteórica rica en oxígeno produce la oxidación de los sulfuros primarios. Si hay suficiente pirita ( $\text{FeS}_2$ ), el ambiente ácido generado favorece el transporte vertical descendente del Cu hacia la zona de cementación o su transporte lateral para formar yacimientos oxidados exóticos de Cu. Todo esto ocurre de manera importante si y solo si la cantidad de agua disponible es la adecuada (ni poca ni mucha: clima semiárido) y la tectónica, la topografía, y las temperaturas son igualmente adecuadas. Ver además: zona de cementación.

**ZONACIÓN** (en inglés: *zoning*): El término es muy amplio, y en mineralogía y yacimientos minerales se refiere a fenómenos de segregación zonal que van desde la escala cristalina (p.ej., cristales de plagioclasa zonados) hasta la de un orógeno (p.ej., zonación metalífera de la cadena andina). Aquí consideraremos en particular la zonación de los minerales de interés económico, a la escala de un yacimiento metalífero o de un distrito. Al respecto, un ejemplo clásico de zonación es la del Distrito de Cornwall (Cornualles; suroeste de Gran Bretaña) donde se definió un esquema clásico con Sn-W en los granitos del centro mineralizador, siguiendo con minerales de Cu hacia la roca encajadora, y finalmente sulfuros de Pb y Zn. La idea básica es que al producirse los pulsos mineralizadores desde un centro (generalmente asociado a un magma intrusivo), los fluidos neumatolítico-hidrotermales van atravesando envolventes de temperatura y presión decrecientes. Esto implica disequilibrios en las condiciones de transporte de

metales en fase gaseosa (fluidos neumatolíticos) que son los primeros en depositarse y, posteriormente, en las condiciones que hacen posible su movilización en forma de iones metales complejos en soluciones hidrotermales. Naturalmente, los metales que forman iones complejos más estables deberían continuar en solución hasta distancias mayores del centro mineralizador. Esto ocurre en la práctica, puesto que los metales más pesados como Au, Pb, etc., que forman complejos más estables, efectivamente se depositan a mayor distancia. Sin embargo, existen tres factores que hacen que este tema no sea tan simple. El primero es la existencia de diversos iones complejos de un mismo metal. Por ejemplo, el oro forma un ión clorurado a alta temperatura y uno sulfurado a temperaturas menores. En consecuencia, el primero se desestabiliza y deposita el Au en un nivel más profundo. El factor señalado puede traducirse igualmente en el depósito del metal bajo distintas formas mineralógicas (y la zonación concierne a los minerales, más que a los metales mismos). Un segundo factor es que frecuentemente existen dos o más pulsos de mineralización, los cuales pueden implicar cambios en la composición de los fluidos y en su temperatura inicial. El tercer factor, también importante, concierne a las interacciones químicas entre los fluidos mineralizadores y las rocas que atraviesan. Finalmente, es importante señalar que la zonación representa a nivel espacial lo que la paragénesis muestra en términos de tiempo, vale decir, son dos expresiones del desequilibrio de los fluidos mineralizadores debidos a los cambios termodinámicos que los afectan. La principal aplicación práctica de la zonación concierne a su uso en exploración minera. Esto es así porque permite prever: a) los cambios que puede experimentar la mineralización en la profundidad de un yacimiento y b) la posible existencia de yacimientos aun desconocidos en el entorno distrital.

**ZONA DE FALLA:** Las grandes fallas geológicas no constan de un solo plano de falla bien definido, sino que corresponden a un volumen tabular denominado zona de falla, constituido por rocas muy fracturadas y numerosos planos de fallas a través de los cuales se realizan los desplazamientos. Es común que las rocas de la zona de falla presenten alteración hidrotermal así como metamorfismo dinámico, con formación de cataclasitas en la zona superior y milonitas en la inferior. En la mega zona de falla de Atacama algunos cuerpos con mineralización ferrífera tipo Kiruna han experimentado el efecto metamórfico antes descrito. Localmente, esto ha generado un bandeamiento de magnetita y mica, adquiriendo así aspecto muy similar al de una formación ferrífera bandeada (BIF).

**ZONA DE SATURACIÓN:** Término que en hidrogeología designa a la zona situada bajo el nivel freático del acuífero. Bajo ella se desarrolla la zona de cementación (sulfuros enriquecidos) en yacimientos cupríferos.

**ZONA DE SUBDUCCIÓN** (en inglés: *subduction zone*): Ver tectónica de placas y zona de Wadati-Benioff.

**ZONA DE WADATI-BENIOFF**: Zona sísmica desarrollada en la parte superior de una placa litosférica en proceso de subducción y por la parte inferior del manto litosférico en contacto con ella. Permite inferir la posición e inclinación de la zona de subducción.

**ZONA VADOSA**: Término hidrogeológico que designa la zona comprendida entre la superficie del terreno y el nivel freático. Es una zona no saturada en agua y que contiene aire en los espacios libres, junto con agua que desciende hacia el nivel freático (o asciende por capilaridad). La zona de oxidación de los yacimientos metalíferos sulfurados se desarrolla en la zona vadosa. La zona vadosa presenta especial riesgo de generación de drenaje ácido, ya sea que se sitúe en yacimientos ricos en pirita o en desechos mineros ricos en el mismo mineral. De ahí que se recurra a su saturación con agua para evitar o retardar dicho proceso en las operaciones de cierre de explotaciones mineras.

**Ver además: Léxico sobre procesos y estructuras geológicas**

**Volver a Geología & Yacimientos Minerales**