



Oro en cuarzo
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Oro

Alfonso Arias y Julián López

Citación: Arias, A. y López, J. (2019). Oro. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El oro, del latín *aurum*, es un metal de transición entre plata y mercurio (McDonald, 2007), denso y blando, muy apreciado por su belleza, utilidad y escasez, características únicas que le han asegurado un papel central en la historia y el desarrollo de las civilizaciones. El nombre (*gold* en inglés) se deriva del inglés histórico “*geolo*”, que describe su color amarillo (McDonald, 2007). Este tiene diferentes tonalidades con brillo metálico; es un metal maleable, fácil de moldear y no se oxida ni pierde su lustre.

Fuera de exhibir un color amarillo en bruto puede presentarse con color negro, naranja, rubí o morado en divisiones finas. Algunos lo consideran el elemento más bello de todos y el metal más dúctil que se conoce. Es químicamente estable y buen conductor del calor y la electricidad. Forma soluciones sólidas con plata, generando *electrum* cuando presenta entre el 30 y el 45% de esta (Ramdhor, 1980). Además, contiene pequeñas concentraciones de Cu, Bi, Pt, Pd y Hg (Ramdhor, 1980), y un isótopo estable con número 197 (McDonald, 2007).

No se conoce con exactitud cuándo y dónde se descubrió, aunque se ha demostrado que muchas culturas de la Antigüedad lo han atesorado y utilizado, especialmente en joyería, hacia el año 4000 a. C.

A finales del siglo XIX e inicios del siglo XX los sistemas monetarios de Estados Unidos y de muchos otros países occidentales siguieron el patrón del oro; con ese estándar un país estuvo de acuerdo en vender y comprar oro a un precio fijo y a intercambiar su moneda de papel por oro, según la demanda. Estados Unidos dejó de aplicar dicho estándar muchas veces y finalmente lo abandonó en 1971.

1. Usos

El oro, aparte de ser un metal tradicionalmente codiciado en joyería por su brillo y belleza, es fundamental por sus usos para el desarrollo de actividades de creciente importancia.

En la industria el oro se emplea para aplicaciones que van desde la ciencia de materiales hasta las ciencias químicas (Corti y Holliday, 2004), y principalmente en electrónica, telecomunicaciones, tratamientos medicinales, tratamientos odontológicos y nanotecnología. El oro se utiliza en las siguientes aplicaciones:

Catalizador. Se usa en aplicaciones comerciales, procesos químicos, purificación del hidrógeno, control de contaminación ambiental (polución) y control de la contaminación producida por automóviles (Corti y Holliday, 2004); también se utiliza como catalizador en la producción comercial del monómero vinil acetato (VAM), usado en pinturas de emulsión y pegantes (Materials World, 2003).

Electrónica. El oro se emplea en telecomunicaciones, tecnologías de la información y usos de seguridad crítica (Materials World, 2003). Asegura la confiabilidad de muchos productos que van desde teléfonos móviles hasta tarjetas de crédito. Los usos más significativos en electrónica incluyen dispositivos semiconductores, conectores, circuitos híbridos, metalizaciones en CD-R y DVD, y soldadura básica en aleaciones. Se utiliza también en alambres finos, para conectar partes de semiconductores como transistores y circuitos integrados, en controles electrónicos de ignición e inyección electrónica de combustible (Corti y Holliday, 2004; Materials World, 2003; McDonald, 2007).

Nanotecnología. El oro es un elemento imprescindible en componentes electrónicos nanométricos (Materials World, 2003). Además, se usa en sensores, materiales ópticamente activos y aplicaciones médicas (Materials World, 2003; Corti y Holliday, 2004), así como en tintas de oro, lubricantes y nanopartes (Mateo, Morales, Avalos y Haza, 2013).

Odontología. El oro y sus aleaciones tienen importantes aplicaciones por su biocompatibilidad, maleabilidad y resistencia a la corrosión (Materials World, 2003; Corti y Holliday, 2004).

Biomedicina. El oro ha llegado a ser clave en muchos tratamientos médicos modernos, desde medicamentos hasta implantes de precisión. Posee un alto grado de resistencia a la colonización bacteriana y por esto es el material principal en implantes con alto riesgo de infección (Corti y Holliday, 2004). Asimismo se utiliza en el tratamiento en pacientes con artritis reumatoidea y, en las últimas décadas, compuestos con oro han sido de interés potencial en los tratamientos del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) y el cáncer (McDonald, 2007).

Aplicaciones térmicas. Debido a la eficiencia del oro como reflector de calor y de radiación infrarroja, se usa en forma líquida para reducir la transmisión de calor en los motores de aviones y en el Programa Espacial Apolo en Estados Unidos (McDonald, 2007).

Otros usos. El oro se emplea como trazador, para terapia radiactiva, joyería y aplicaciones decorativas. También se emplea en la elaboración de medallas, monedas y barras (McDonald, 2007).

2. Ambiente geológico

El oro está genéticamente asociado, sobre todo, a regiones donde hubo actividad ígnea, de modo preferente con rocas félsicas (Bateman, 1957), aunque se pueden encontrar yacimientos asociados con rocas ígneas, rocas sedimentarias, rocas metamórficas, depósitos aluviales y de concentración supergénica. Concentraciones de oro de interés minero pueden ocurrir en ambientes geológicos de todas las edades y en litologías muy variadas; en rocas tan antiguas como del Proterozoico o en materiales geológicos tan jóvenes como aluviones recientes.

Los ambientes geológicos de formación de los depósitos de oro van desde cinturones orogénicos y arcos de islas relacionados con zonas de subducción en las que se generan importantes pulsos magmáticos, hasta ambientes cratónicos estables, aunque se encuentran en ambientes distensivos asociados con sulfuros masivos.

2.1. Características

El oro es un elemento metálico de color amarillo que constituye cristales octaédricos, los cuales aparecen a menudo en grupos arborescentes con cristales alargados que se forman irregularmente, pasando por formas filiformes, reticuladas y dendríticas, de forma alargada o aplastada. El oro se distingue de otros minerales de color amarillo como pirita, calcopirita y de las pajuelas de mica alterada, por su sectilidad y gran peso específico (Klein y Hurlbut, 1988). El oro presenta una estructura cristalina cúbica centrada en las caras y una densidad de 19 300 g/m³ cuando es puro; funde a 1064.43 °C y alcanza su ebullición a 2856 °C.

2.2. Mineralogía

El oro se encuentra en la naturaleza como metal en estado libre, incluido en las estructuras cristalinas de otros minerales, o combinado con otros elementos formando compuestos de aleaciones o minerales como sulfosales, teluros y seleniuros (tabla 1).

En estado nativo, el principal modo de presentación del oro se da generalmente formando aleación con plata (solución sólida completa debida a sus radios atómicos), cobre, bismuto, mercurio y a veces con elementos del grupo del platino como platino, paladio, rutenio, iridio (Nekrasov, 1996; McDonald, 2007).

Tabla 1. Denominación de las principales aleaciones y minerales de oro

Grupo	Mineral	Composición química
Elemento nativo	Oro	Au
	Electrum	Au, Ag ≥ 20 %
	Cuproáureo	Au, Cu
	Porpezita	Au, Pd hasta 10 %
	Rhodita	Au, Rh
	Iridita	Au, Ir
	Oro platínico	Au, Pt
	Oro bismutínico	Au, Bi
Sulfuro	Uytenbogardita	Ag ₃ AuS ₂

(.../...)

(.../...)

Grupo	Mineral	Composición química
Telururo	Calaverita	AuTe ₂
	Krenerita	(Au, Ag)Te ₂
	Petzita	Ag ₃ AuTe ₂
	Muthmanita	(Au, Ag)Te
	Magyagita	Pb ₅ Au(Se, Te) ₄ S ₅₋₈
	Silvanita	(Au, Ag)Te ₄
Seleniuro	Fischerita	Ag ₃ AuSe ₂
Sulfosal	Maldonita	Au ₂ Bi
	Auroestibita	AuSb ₂

Fuente: Boyle (1979)

2.3. Geoquímica

La geoquímica cumple un papel importante en la minería del oro ya que, además de ser una técnica de prospección, informa sobre su abundancia, asociación y distribución en la corteza terrestre.

El oro se representa en la tabla periódica de los elementos con el símbolo Au, y se encuentra ubicado en el grupo 11, en el campo de los elementos o metales de transición. Mineralógicamente se clasifica como un elemento nativo y forma parte del grupo 1, al que también pertenecen la plata y el cobre (grupo del oro), todos ellos de ocurrencia nativa y solubles mutuamente (Stanton, 1972).

En la corteza terrestre el contenido promedio de oro es de 0.005 ppm (McDonald, 2007); en rocas ultramáficas es de 0.0032 ppm; en granodioritas, de 0.0023 ppm; en calizas, de 0.005 ppm; en areniscas, de 0.005 ppm, y en *shales*, de 0.004 ppm (Rose, 1979).

Goldschmidt (1922, citado en Krauskopf, 1967) agrupa el oro principalmente con los elementos siderófilos, aunque también se agrupa con los elementos calcófilos. En términos generales, en depósitos minerales de metales preciosos se asocia (tabla 2) sobre todo con plata (Ag), arsénico (As), antimonio (Sb), mercurio (Hg), selenio (Se) y telurio (Te) y, en algunos depósitos de sulfuros, con hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu).

Tabla 2. Asociaciones elementales comunes en algunos depósitos minerales de oro

Asociación elemental	Tipo de depósito
Au-As-Sb (CO ₂ -Si)	Orogénico. Venas de Au y cuarzo hospedadas en esquistos
Ag-Au-As-Sb-Te±Hg-Mn (S-Si)	Epitermal. Venas de Au-Ag hospedadas en rocas volcánicas
Fe - Cu - Au ± Ag - Bi - Mo Te (S)	Pórfido Cu-Au y pórfido Mo
Fe-Mo (S)	
Cu-Au-Bi (S)	
Fe-Cu-Pb-Zn-Ag	
W - Mo ± Cu - Pb - Zn - Bi - As	Relacionado a intrusivo- <i>skarn</i> proximal
Fe - Pb - Zn - Cu - Ag ± Hg - Sb - Au (S)	Sulfuros masivos volcanogénicos

Fuente: McDonald (2007)

2.4. Tipo de depósito

A continuación se describen los modelos de los tipos de depósitos de oro, de acuerdo con los modelos de depósitos minerales implementados por United States Geological

Survey (USGS) (Cox y Singer, 2002; Bliss, 1992), British Columbia Geological Survey (BCGS) (Lefebure y Ray, 1995 y Lefebure y Høy, 1996), Yukon Geological Survey (Fonseca y Bradshaw, 2005) y Canada Geological Survey.

2.4.1. Paleoplacer de Au-U

Según Cox y Singer (1992), se trata de depósitos de placer de Au, U y EGP (elementos del grupo del platino), en conglomerados antiguos, y según la British Columbia Geological Survey (BCGS, 2002), corresponde al modelo de depósito de paleoplacer U-Au-PGE-Sn-Ti-diam-gar-zir.

En cuanto al ambiente geológico, en ambos modelos se considera que el depósito se encuentra caracterizado por presentarse en capas de conglomerados oligomícticos maduros, en secuencias espesas de conglomerados menos maduros y areniscas depositados sobre granito-greenstone de edad Arqueano, con rocas volcánicas basales.

Estas secuencias se depositan en cuencas epicontinentales alargadas o de semigraben, en las que las partes basal y media de abanicos aluviales se depositan sobre el lado inclinado de la cuenca, en un ambiente atmosférico reductor para preservar pirita y uraninita detríticos.

Adicionalmente, se encuentran asociados con depósitos de placer recientes, venas de cuarzo con oro de baja sulfuración y oro tipo *Homestake* en rocas del basamento.

Mineralógicamente, estos depósitos se caracterizan por presentar cuarzo, oro, pirita, uraninita, brannerita, cromita, zircón, monazita, leucoxeno, aleaciones de osmio-iridio, platino y esperrilita, y plata como subproducto. Las ocurrencias del Proterozoico medio y del Fanerozoico contienen solo trazas de pirita y ausencia de uraninita. Las anomalías geoquímicas que se pueden esperar son para Au, U, EGP, así como anomalías radiactivas.

Ejemplos de estos depósitos son Witwatersrand en Sudáfrica; Elliot Lake en Ontario (Canadá); Jacobina en Brasil y Tarkwa en Ghana.

2.4.2. Depósitos de Au-Ag diseminados, hospedados en rocas carbonatadas

Los UPME depósitos tipo Carlin (figura 1) oro micrón hospedado en sedimentos, oro de remplazamiento en calizas silíceas o de oro invisible. Se trata de oro y sulfuros de tamaño de grano muy fino, diseminados en zonas descarboxatadas de rocas calcáreas carbonáceas y jasperioides asociados. Las rocas hospedantes corresponden a calizas o dolomitas arcillosas carbonáceas o limos con laminación, comúnmente con *shales* carbonáceos a partir de diques félsicos, por lo general porfiríticos. Estos depósitos son principalmente de edad Terciario, aunque pueden ser de cualquier edad.

Otros tipos de depósitos que se le asocian son *skarn* de W-Mo, pórfidos de molibdeno, Au en placer y venas de estibnita-barita; mineralógicamente se encuentran constituidos por oro nativo (tamaño micrón), pirita, rejalgar,

oropimente, \pm arsenopirita, \pm cinabrio, \pm fluorita, \pm barita, minerales de talio y estibnita; además de cuarzo de tamaño de grano fino, calcita, minerales de arcilla y materia carbonosa (venas de calcita de estados tardíos).

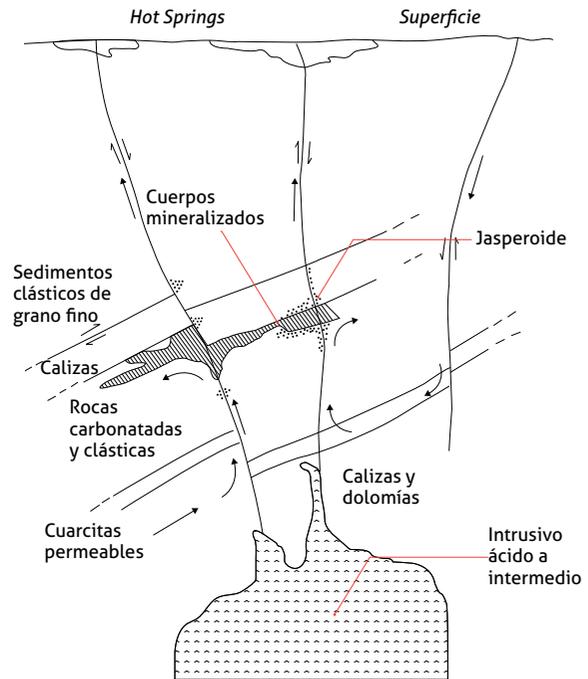


Figura 1. Modelo esquemático de un depósito epitermal tipo Carlin

Fuente: Tomado de Oyarzun (1991)

Presenta dos zonas de alteración que pueden estar fuertemente controladas por los rasgos estratigráficos y estructurales: una no oxidada en el núcleo central de fuerte silicificación, que se caracteriza por la presencia de jasperoide, cuarzo (a veces en venas), illita, caolinita y calcita, localmente con carbono amorfo, y otra zona oxidada localizada en la periferia y caracterizada por contener caolinita, montmorillonita, illita, jarosita y alunita, además de presentar descarboxatización. Las anomalías geoquímicas que se pueden esperar se agrupan en dos conjuntos: Au+As+Hg+W o Mo, y As+Hg+Sb+Tl o Fe, esta última sobreponiéndose a la primera. NH₃ es importante en algunos depósitos; la proporción Au: Ag es 10:1 o mayor.

Ejemplos de estos depósitos en Estados Unidos son Carlin y Getchell en Nevada, y Mercur en Utah.

2.4.3. Depósitos de Au-Ag de fuentes termales

Según Panteleyev (1996a) corresponden a depósitos relacionados con fuentes termales (epitermales de más baja temperatura) y de sínter silíceo subaéreo (figura 2). De acuerdo

con Panteleyev (1996a) y Berger (1992b), estos depósitos se caracterizan por presentar calcedonia aurífera o sílice opalina, y cuarzo de grano fino formando venas y enrejados (*stockworks*), rellenando la matriz de brechas volcánicas silicificadas y, menos comúnmente, de rocas sedimentarias. Estas conforman la parte más superior del sistema epitermal, el cual desarrolló casquillos síliceos mineralizados, desde pocos hasta cientos de metros por debajo de la superficie, con depósitos de sílice subaéreos cerca de la paleotabla de agua y brechas de explosión más arriba.

De conformidad con Berger (1992b), los depósitos consisten de sílice y cuarzo de tamaño de grano fino en

brechas silicificadas que contienen oro, pirita y sulfuros de arsénico y antimonio. A este tipo de depósitos se asocia riolita con textura porfírica o brechada, con rangos de edad que incluyen el Cenozoico. El ambiente de depósito corresponde a centros volcánicos riolíticos subaéreos, domos por flujos riolíticos o complejos de calderas y sistemas de fracturas radiales y en anillo, así como zonas de poca profundidad relacionadas con sistemas geotermales fósiles, originados en ambientes tectónicos de *rifting* de margen continental y sistemas de fracturas locales asociados con vulcanismo bimodal basáltico-riolítico o intermedio a máfico en bajo volumen.

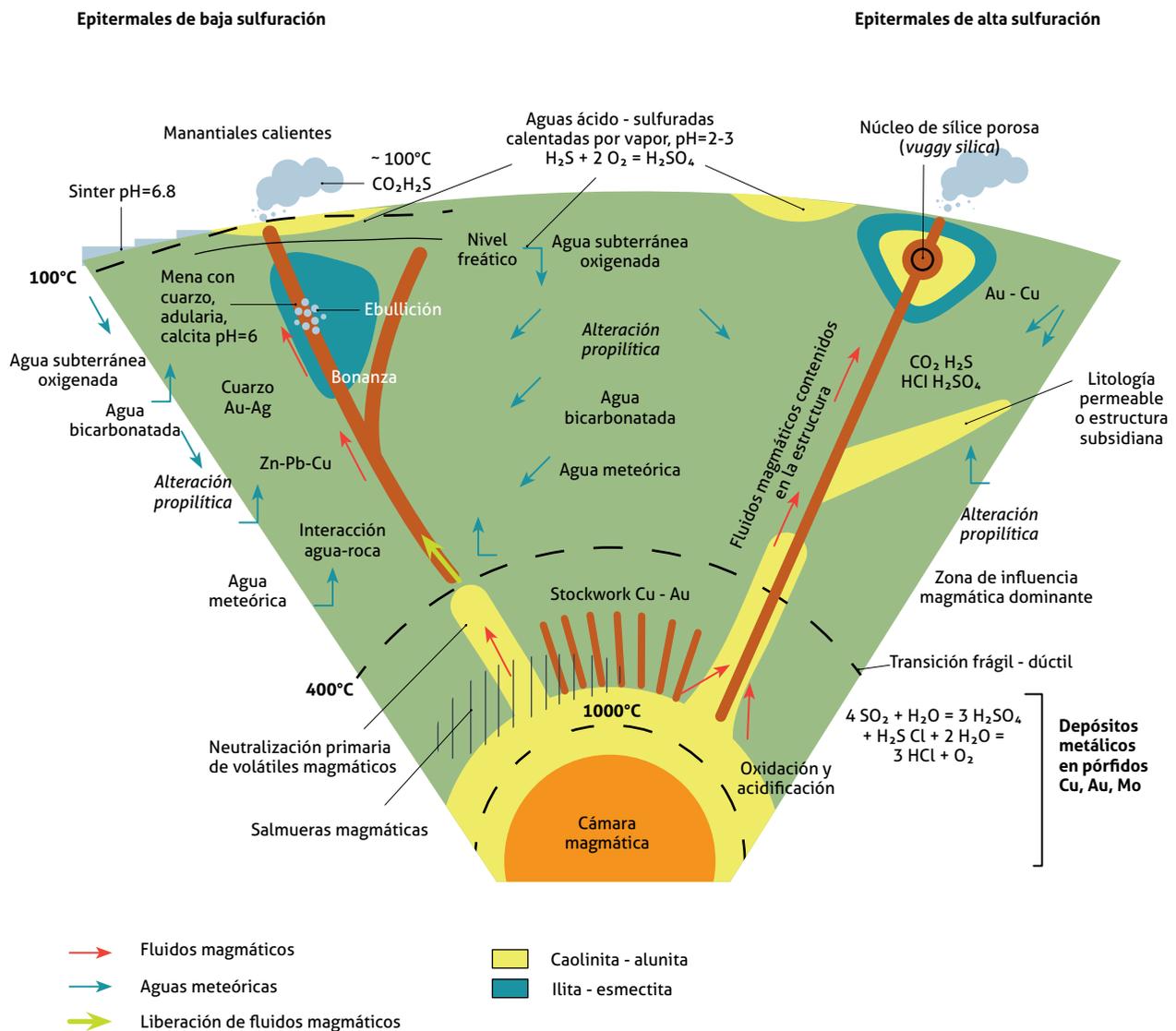


Figura 2. Esquema generalizado en el que se comparan los procesos y la localización de los depósitos relacionados con fuentes termales e hidrotermales de alta y baja sulfuración

Fuente: Camprubi *et al.* (2003)

Los tipos de depósito que se le asocian son venas de cuarzo epitermales, epitermales Au-Ag, fuentes termales de Hg, solfataras de azufre y Au de placer. La mineralización se encuentra dominada por oro nativo, pirita, estibinita, rejalgar, arsenopirita, \pm esfalerita, \pm calcopirita, \pm fluorita, u oro nativo, telurios, pirita con contenidos de marcasita, sulfosales, *electrum* y cinabrio en el tope de los depósitos. Además, las zonas de alteración de estos sistemas se presentan distribuidas desde la parte superior hasta la base del sistema, caracterizándose por la presencia de calcedonia, silicificación masiva y penetrativa en las rocas adyacentes a ella, enrejados, venas de cuarzo y adularia, y brechas cementadas con cuarzo, o cuarzo y clorita. Se encuentran generalmente venas de calcedonia con ópalo y, en algunos depósitos, alunita y pirofilita; además puede encontrarse feldespatos de amonio (buddingtonita). La zona de meteorización presenta la roca encajante blanqueada, limonitas amarillas con jarosita y alunita de tamaño de grano fino, hematita y goethita.

Las anomalías geoquímicas que se pueden esperar son Au + As + Sb + Hg en la parte superior del sistema, con incremento de Ag y Ba en profundidad con decrecimiento de As + Sb + Tl + Hg, y localmente con Ni, B, Li y W. Las rocas mineralizadas pueden blanquearse fuertemente en superficie. Además, es notable la ausencia de Se, Te, F, Mo, Sn y Mn.

Ejemplos de estos depósitos se encuentran en McLoughlin, California; Round Mountain, Nevada, y Delamar, Idaho, todos en Estados Unidos.

2.4.4. Depósitos epitermales de Au-Ag-Cu de alta sulfuración

Según Panteleyev (1996b) y Berger (1992c) corresponden a depósitos de sulfato ácido (epitermal), Au cuarzo-alunita, alunita-caolinita \pm pirofilita, alteración argílica avanzada tipo Nansatsu y enargita aurífera. Los depósitos se mencionan comúnmente como tipo *sulfato ácido*, dependiendo de la química de los fluidos hidrotermales; como tipo *cuarzo-alunita* o *caolinita-alunita*, dependiendo de su mineralogía de alteración, o tipo *alta sulfuración* en referencia al estado de oxidación de los fluidos ácidos, responsables de la alteración y mineralización (figura 2).

Los depósitos presentan venas, brechas porosas y remplazos de sulfuros, desde vainas (*Pods*) hasta lentes masivos, que ocurren en secuencias volcánicas asociadas con niveles superiores de sistemas hidrotermales, marcados por lixivios-ácidos, y alteraciones argílica avanzada y silíceas. Estos depósitos a menudo se encuentran asociados con *stocks* subvolcánicos, diques y brechas, en ambientes subvolcánicos a volcánicos en zonas de fracturas en anillo de calderas, den-

tro del edificio volcánico; en complejos de flujos de lava y domos, y con escasa frecuencia en maars y otras estructuras volcánicas. Pueden estar genéticamente relacionados con sistemas de pórfidos cupríferos en intrusiones mineralizadas profundas que infrayacen los estratovolcanes.

Estos depósitos presentan un rango de edad sobre todo Cenozoico, menos comúnmente Mesozoico y rara vez en cinturones volcánicos de edad Paleozoico. La mineralización se encuentra hospedada por lo general en rocas volcánicas piroclásticas y de flujo, como andesita a dacita subaérea, y riodacita y sus equivalentes intrusivos subvolcánicos. Los depósitos son de forma irregular usualmente, la cual está determinada por la permeabilidad de la roca encajante y la geometría de la estructura que controla la mena, y corresponde a venas y sulfuros masivos, remplazando lentes y vainas (*Pods*), enrejados y brechas hidrotermales, caracterizados por la presencia de sílice porosa, drusas en cavidades, venas bandeadas y remplazo masivo de la roca caja con cuarzo de tamaño de grano muy fino.

La mineralogía característica de este tipo de depósitos está dada por la presencia de pirita, enargita/luzonita, calcocita, covelita, bornita, oro, *electrum*, calcopirita, esfalerita, tetraedrita/tennantita, galena, marcasita, arsenopirita, sulfosales de plata, huebnerita y telurios de metales preciosos, incluyendo goldfielita, en algunos casos asociados con azufre nativo. Las zonas de alteración presentan conjuntos de altas temperaturas, conformadas por cuarzo poroso o de tamaño de grano fino, caolinita/dickita, barita, hematita, sericita/illita, arcillas amorfas y sílice porosa, alunita, pirofilita, corindón, diásporo, andalusita, zunyita, jarosita, montmorillonita turmalina, dumortierita, topacio, sulfatos de Al-P (hinsdalita, woodhouseita, crandalita, etc.), y azufre nativo. La alteración argílica avanzada es característica y puede ser extensa arealmente y prominente visualmente. La meteorización presenta abundante limonita amarilla, jarosita, goethita, argilización blanca con caolinita, venas de alunita blanca finogranuda y hematita.

Las anomalías geoquímicas están dadas por la presencia en la parte más alta del sistema de Au + As + Cu dominantes, + Hg + Sb + Ag + Bi + B, con incremento de los metales base (Pb + Zn) + Mo + Sn + Te \pm W, en profundidad.

Ejemplos de depósitos son Goldfield en Nevada (Estados Unidos); Iwato y Kasuga Mine en Japón; El Indio en Chile, y Summitville en Colorado (Estados Unidos).

2.4.5. Depósitos epitermales de Au-Ag de baja sulfuración

De acuerdo con Panteleyev (1996); Mosier, Singer y Berger (1992a); Mosier, Singer y Berger (1992b) y Mosier *et al.* (1996) corresponden a depósitos de tipo (epitermal) adu-

laria-sericita, cuarzo-adularia, venas epitermales tipo Comstock, venas epitermales tipo Sado, venas epitermales tipo Creede, bonanza de Au-Ag, venas polimetálicas y cloro-alcálico (hidrotermal). Tiene como elementos de interés Au, Ag, Pb, Zn, Cu (figura 2).

Estos depósitos se caracterizan por presentar vetas de cuarzo, enrejados y brechas portadoras de oro, plata, *electrum*, argentita y pirita, con variables y menores contenidos de esfalerita, calcopirita, galena, tetraedrita rara y sulfosales de plata formados en ambientes de alto nivel (epizonales) hasta cercanos a la superficie. Están asociados con sistemas hidrotermales o geotermales en islas volcánicas y arcos magmáticos de margen continental, y con campos magmáticos continentales con estructuras de extensión.

Se depositan en sistemas hidrotermales de alto nivel desde profundidades de aproximadamente 1 km hasta ambientes de fuentes termales, asociados con sistemas de fracturas regionales relacionadas con grábenes, calderas resurgentes, complejos de flujos de lava y domos, y raramente maar-diatremas. *Stocks* subvolcánicos o diques y diatremas brechadas de guijarros se presentan en algunas áreas. Localmente se definen asociaciones con cuerpos intrusivos más profundos. No se restringen a un rango de edad determinado, aunque los depósitos de edad Terciario son los más abundantes.

Dentro de las rocas que hospedan la mineralización predominan las de composición andesítica calcoalcalina entre la mayoría de tipos de rocas volcánicas, aunque algunas se desarrollan en áreas de volcanismo bimodal. Menos comunes son las asociaciones con rocas intrusivas alcalinas y vulcanitas shoshoníticas. Por lo general, se asocian con sedimentos clásticos y epiclásticos en cuencas intravolcánicas y depresiones estructurales.

Desde la superficie y a medida que se aumenta en la profundidad la mineralización está distribuida por zonas metalíferas, y presenta Au-Ag-As-Sb-Hg, Au-Ag-Pb-Zn-Cu, y Ag-Pb-Zn, mostrando una zonación fuerte en la vertical con un tope rico en Au-Ag, pasando a una zona de metales base relativamente rica en Ag, hasta una zona rica en metales base, la cual en profundidad se hace escasa, pasando a una zona pirítica. En rocas alcalinas huéspedes abundan teluros, mica vanadífera (roscoelita) y fluorita, con algo de molibdenita. Los minerales que constituyen este tipo de depósito son pirita, *electrum*, oro, plata, argentita, calcopirita, esfalerita, galena, tetraedrita, sulfosales de plata o seleniuros, además de cuarzo, amatista, calcedonia, pseudomorfosis de cuarzo por calcita, calcita, adularia, sericita, barita, fluorita, carbonatos de Ca-Mg-Mn-Fe, hematita y clorita.

En estos depósitos hay una silicificación extensa, caracterizada por múltiples generaciones de cuarzo y otras variedades de sílice comúnmente acompañadas de adularia y calcita. La silicificación penetrativa en venas es flanqueada por asociaciones de sericita-illita-caolinita. La alteración argílica intermedia se forma adyacente a algunas vetas y se caracteriza por la presencia de caolinita-illita-montmorillonita (esmeclita), en tanto que es posible que se formen halos de alteración argílica avanzada en el tope superior de la zona mineralizada (caolinita-alunita). La alteración propilitica domina en los sectores profundos y periféricos de los cuerpos minerales.

Las anomalías geoquímicas se caracterizan por presentar valores elevados de Au, Ag, Zn, Pb, Cu y As, Sb, Ba, F, Mn; localmente con Te, Se y Hg, aunque Bi y W pueden estar presentes. Los depósitos de plata son más ricos en Pb y Zn que los de Au y Au-Ag. Cuando se perforan las zonas de alimentación en fuentes termales y sínters silíceos se pueden identificar depósitos enterrados.

Ejemplos de depósitos son: Distrito de Toadoggon-Lawyers, Baker, Shas; Blackdome; Premier Gold (Silbak Premier); Cinola; Comstock, Aurora en Nevada (Estados Unidos); Bodie en California (Estados Unidos); Creede en Colorado (Estados Unidos); Republic en Washington (Estados Unidos); El Bronce en Chile; Guanajuato en México; Sado, Hishikari en Japón; Colqui en Perú; Baguio en Filipinas, y Ladolam en Lihir, Papúa Nueva Guinea.

2.4.6. Depósitos de Au en venas de cuarzo

De acuerdo con Ash y Alldrick (1996) y Berger (1992b) estos depósitos corresponden a venas de la veta madre (*Mother Lode veins*), oro en rocas verdes, vetas de oro del Arcaico, venas mesotermales de cuarzo-oro, venas de orocuarzo bajas en azufre, vetas de oro o depósitos de oro orogénico (Groves *et al.*, 1998; Goldfarb *et al.*, 2005). Se caracterizan por presentar venas de cuarzo masivas y persistentes que contienen oro y vetillas con cantidades menores de sulfuros que cortan una amplia variedad de rocas encajantes (en especial rocas volcánicas metamorfoseadas regionalmente y sedimentos volcánicos), y están localizadas a lo largo de fallas regionales mayores y sus extensiones (*splays*) relacionadas (figura 2). La roca encajante está alterada típicamente a sílice, pirita y moscovita, dentro de un amplio halo de carbonato.

Consisten en venas formadas dentro de fallas y sistemas de fracturas producidas por compresión regional o transpresión (terrenos de colisión), que incluyen las fallas reversas mayores y de segundo y tercer orden, asociadas con cinturones móviles de margen continental y márgenes

nes acrecionadas, donde las venas son posmetamórficas y localmente cortan rocas graníticas. La depositación del oro se produce en niveles corticales, correspondientes a la zona de transición, a profundidades de 6 a 12 km, a presiones entre 1 y 3 kb y temperaturas entre 200 y 400 °C. Además, los depósitos pueden tener una extensión vertical superior a 2 km y carecen de zonación pronunciada. La edad de la mineralización es posterior al pico de metamorfismo, aunque venas de cuarzo-oro son particularmente abundantes en el Arqueano y el Mesozoico (figura 3).

Las rocas que hospedan o que se asocian con este tipo de depósitos litológicamente son muy variadas, por lo general de facies esquistos verde que varían desde virtualmente no deformadas hasta totalmente esquistosas, y constan de vulcanitas máficas, ultramáficas y félsicas, serpentinitas, peridotitas, dunitas, gabros, dioritas, grauwacas, *shale*, calizas y cuarcitas, cinturones de granito-rocas verdes (*greenstone belts*), e intrusiones félsicas e intermedias. Los depósitos se encuentran constituidos por venas tabulares en fisuras en las litologías huésped más competentes y vetillo y largueros (*stringers*), formando enrejados en litologías menos competentes. Ocurren como un sistema de venas en échelon a todas las escalas. Las venas usualmente tienen contactos agudos con las rocas encajantes y exhiben una variedad de texturas, incluyendo la masiva, encintada o bandeada y enrejados; la textura se puede modificar o destruir por deformación subsecuente.

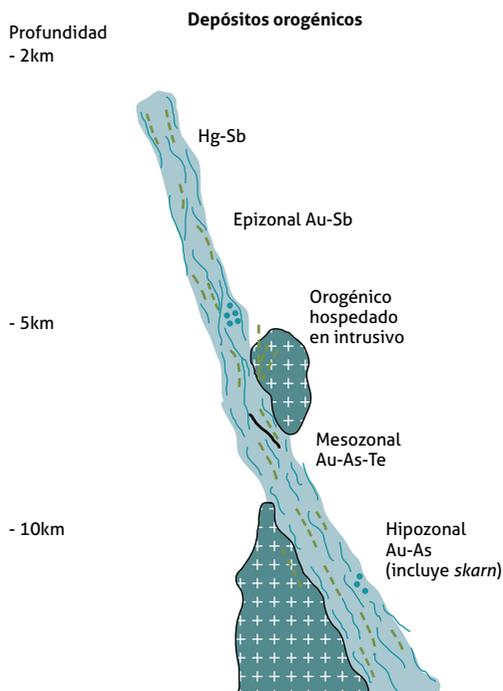


Figura 3. Depósitos de oro asociados con terrenos metamórficos
Fuente: Groves *et al.* (1998) y Goldfarb *et al.* (2005)

La mineralogía que permite diferenciar este tipo de depósitos consta de oro nativo, pirita, arsenopirita, galena, esfalerita, calcopirita, pirrotita, telurios, scheelita, bismuto, cosalita, tetrahedita, estibinita, molibdenita, gersdorffite (NiAsS), bismutinita (Bi₂S₂) y tetradimita (Bi₂Te₂S). Además, se encuentran asociados cuarzo, carbonatos, albita, fuchita, sericita, fluorita, moscovita, clorita, turmalina y grafito.

Las alteraciones como silicificación, piritización y metasomatismo de potasio generalmente ocurren adyacentes a las venas (por lo regular a menos de 1 m), dentro de zonas amplias de alteración de carbonato, con vetillo de ferrodolomita o sin él, que se extienden por decenas de metros desde las venas. El tipo de alteración del carbonato refleja la litología primaria de la roca encajante; rocas ultramáficas-talco, magnesita ferrífera; rocas máficas volcánicas-anquerita, clorita; sedimentos-grafito y pirita; intrusiones félsicas a intermedias-sericita, albita, calcita, siderita, pirita. Rocas cuarzo-carbonatadas alteradas y pirita son a menudo los minerales más prominentes de alteración en la roca encajante. Fuchita, sericita, turmalina y scheelita son comunes donde las venas están asociadas con intrusiones félsicas a intermedias. Los minerales generados por meteorización son limonita distintiva amarilla-carmelita debido a la oxidación de carbonatos de hierro y magnesio cortadas por venas, y vetillas blancas de cuarzo y dolomita ferrosa. La mica cromífera verde también puede estar presente, además de *chips* de cuarzo abundantes contenidos en los suelos.

Las anomalías geoquímicas están dominadas por valores elevados de Au, Ag, As, Sb, K, Li, Bi, W, Te y B ± (Cd, Cu, Pb, Zn y Hg) en rocas y suelos, y de Au en sedimentos activos de corrientes.

Ejemplos de estos depósitos son Carson Hill, Jackson-Plymouth y el Distrito Mother Lode en Estados Unidos, y los Montes Urales en Rusia.

2.4.7. Depósitos porfiríticos de Cu-Au

Según (Pantaleyev, 1996) y (Cox, 1992) corresponden a depósitos de pórfidos de cobre, pórfidos de Cu-Au, pórfidos de Cu-Au alcalinos y pórfidos dioríticos con cobre (figura 4). Estos depósitos se caracterizan por presentar enrejados, vetillas y diseminaciones de pirita, calcopirita, bornita y magnetita que ocurren en zonas grandes de mineralización económicamente explotables, en intrusiones porfiríticas de composición diorítica a sienítica o cerca de ellas. La mineralización está espacial, temporal y genéticamente asociada con alteración hidrotermal de cuerpos intrusivos y rocas encajantes.

Estos depósitos se encuentran asociados principalmente a cinturones orogénicos en los límites de placas convergentes, por lo general en arcos de islas que suprayacen la corteza oceánica. Químicamente se distingue magmatismo con intrusiones alcalinas que varían en su composición de

gabro, diorita y monzonita a intrusiones de sienita nefelínica y rocas volcánicas de afinidad shoshonítica. Las magmas se introducen a lo largo de los ejes de arcos de islas o en estructuras que coincidan con fallas en profundidad y corten los arcos de islas.

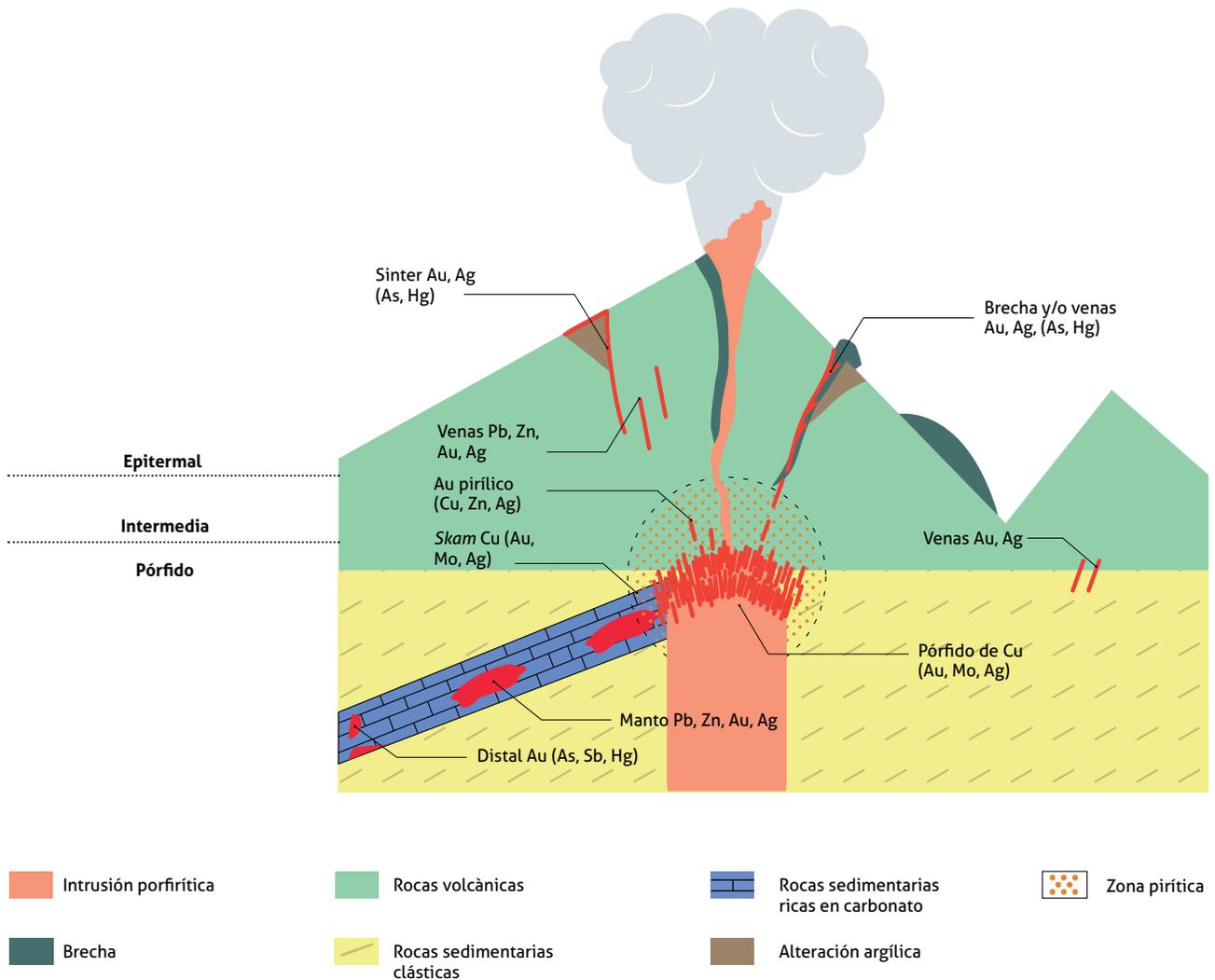


Figura 4. Diagrama esquemático de un pórfido

Fuente: Sinclair (2007)

La mineralogía típica de un depósito de pórfido cuprífero consta de calcopirita ± bornita; trazas de oro nativo, *electrum*, silvanita y hessita; cuarzo + feldespato de potasio + biotita + magnetita ± clorita ± actinolita ± anhidrita, y pirita + sericita ± minerales arcillosos ± calcita, los cuales pueden ocurrir en venillas. La estructura en el modelo es de venillas y disseminaciones. Los minerales de alteración

corresponden a cuarzo ± magnetita ± biotita (clorita) ± feldespato de potasio ± actinolita ± anhidrita en la parte interior del sistema, mientras que en el exterior, zona propilítica. Cuarzo tardío + pirita + mica blanca ± pueden sobrepresionarse a la alteración temprana de feldespatos (figura 5).

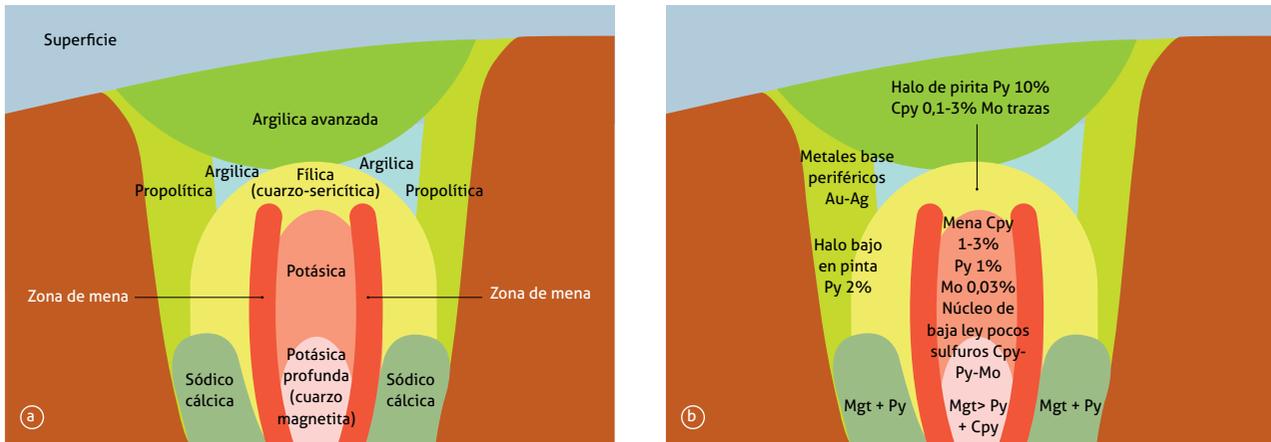


Figura 5. Sección esquemática de las zonas de alteración y mineralizaciones asociadas a un depósito de pórfido a) zonas de alteración; b) principales minerales asociados

Fuente: Maksaeve (2004) y Lowell y Gilbert (1970)

Los rasgos geoquímicos elementales que permiten diferenciar este tipo de depósitos son Cu, Au y Ag en la zona central, y Mo en la periferia. Anomalías periféricas de Pb, Zn y Mn pueden estar presentes si la alteración tardía de sericitita-piritita es fuerte. La relación Au (ppm): Mo (%) es 30 en la zona de mena.

Ejemplos de estos depósitos se encuentran en Dos Pobres, Arizona (Estados Unidos); Copper Mountain, Columbia Británica (Canadá), y en Panamá, Puerto Rico.

2.4.8. Depósitos de oro en aluviones (placers)

Estos depósitos ocurren en dos formas principales: una caracterizada por la presencia de tamaño de grano fino, asociado principalmente a un marco tectónico estable (ambientes de escudo o plataforma y planicies intramontañas), donde el retribajamiento del material clástico se ha hecho durante largo tiempo, y otra caracterizada por la presencia de material grueso, que ocurre sobre todo en cinturones orogénicos y arcos volcánicos del Cenozoico y Mesozoico, generalmente a lo largo de fallas mayores.

Hails (1976, citado en Guilbert y Park, 1985) define los placeres como depósitos minerales en superficie formados por concentración mecánica de partículas minerales pesadas, procedentes de fragmentos meteorizados, comúnmente debida a la acción de corrientes aluviales, aunque también pueden ser marinos, eólicos, lacustres o glaciares. Los placeres minerales más comunes y abundantes son los de metales nativos, especialmente oro y del grupo del platino, y de otras fases como casiterita, cromita, wolframita, rutilo, magnetita, ilmenita, zircón y muchas gemas.

Los depósitos de concentración fluvial ocurren principalmente en canales de primer orden y a lo largo de la roca base en corrientes de alta energía, ángulo alto y baja sinuosidad. Las concentraciones ocurren a lo largo de superficies de erosión, en la base de la secuencia del canal. Los depósitos de abanicos aluviales, abanicos de delta y de delta se distinguen de los placeres fluviales cuando estos ocurren en ambientes relativamente confinados, y están formados sobre todo por arenas y gravas masivas o gradadas, localmente intercaladas. Placeres coluviales se desarrollan por lo general a partir de depósitos residuales de fuentes primarias de filones, asociados con migración de minerales pesados. Placeres glaciofluviales y glaciares están principalmente restringidos a áreas donde el hielo o las aguas meteóricas han erodado depósitos de placer preexistentes. Los depósitos de oro de placer contienen más de dos tercios partes de reservas de oro en el mundo y cerca del 25 % de la producción total conocida en la Columbia Británica.

Ejemplos de estos depósitos se encuentran en varias localidades de Columbia Británica; en el río Tapajos (Brasil); Westland y Nelson (Nueva Zelanda); Yana-Colyma (Rusia); Sierra Nevada (Estados Unidos); río Huanuni y Ocurí (Bolivia), y el Cinturón Sundaland (Tailandia); en los dos últimos se produce estaño.

2.5. Métodos de prospección

Como en otros minerales, los estudios deben realizarse en las siguientes etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada.

En la etapa de *reconocimiento* se identifican las áreas con potencial de mineralización a partir de los resultados de los estudios geológicos regionales, que incluyen comprobación de la fotointerpretación, ejecutando cartografía aérea de anomalías de color y la inspección preliminar de campo. También se llevan a cabo otros trabajos regionales, por ejemplo estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y electromagnéticos.

La *prospección* se realiza con el propósito de identificar el depósito posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques), y perforaciones aisladas para medir el comportamiento de la mineralización en la profundidad. Se ejecutan trabajos geofísicos mediante métodos magnéticos, electromagnéticos y geoelectrónicos preferentemente. Se deberán obtener con carácter preliminar las dimensiones y la morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales. Atendiendo al grado de confiabilidad de los resultados obtenidos se calcularán recursos inferidos que deben utilizarse en un estudio conceptual, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados.

La *exploración general* permite la delineación más confiable de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada; estudios estratigráficos; muestreos superficiales de afloramientos; trabajos geofísicos complementarios que pueden incluir métodos magnéticos, electromagnéticos y geoelectrónicos más detallados, así como la realización de apiques y perforaciones, los cuales conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delinearán mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características. Se realizarán los estudios metalúrgicos preliminares, además de los estudios de prefactibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la continuación hacia la etapa siguiente. Por último, se calcularán recursos indicados e inferidos y reservas probables.

Para los depósitos extremadamente complejo hasta aquí llega la investigación, ya que la decisión que se toma es abandonar o continuar con la explotación y la investigación simultáneas.

La *exploración detallada* permite la delineación tridimensional detallada de los depósitos, mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones, así como la distribución detallada de los tenores y otras características importantes, tanto en lo referente a sus posibles usos como a la explotación y el beneficio mineral.

Se realizarán los estudios metalúrgicos a escala industrial necesarios en esta etapa, así como los de factibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la planificación de la explotación minera. Se calcularán, finalmente, recursos medidos, indicados e inferidos, y reservas probadas y probables.

2.6. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se describen los métodos de extracción y beneficio en la minería aurífera.

2.6.1. Sistemas de extracción

El agotamiento progresivo de los depósitos minerales próximos a la superficie y de alta ley ha obligado a las compañías explotadoras a considerar los yacimientos profundos, con condiciones geológicas más complejas y situaciones más desfavorables en cuanto a relaciones estéril-mineral, aguas subterráneas, estabilidad de taludes, etc.

La necesidad de garantizar la viabilidad económica de las operaciones ha exigido, durante las tres últimas décadas, aprovechar las economías de escala, con fuertes ritmos de producción y maquinaria de gran tamaño. Después de la Segunda Guerra Mundial el diseño de los equipos evolucionó y se perfeccionó hasta adoptar las formas que hoy en día se consideran clásicas. Se produjo primero un aumento espectacularmente rápido en las dimensiones de las máquinas, que en general se caracterizaban por estar impulsadas por robustos motores diésel de régimen lento y aspiración natural, que se acoplaban a transmisiones mecánicas.

Paralelamente, algunos fabricantes ensayaban y desarrollaban máquinas con transmisiones eléctricas. Estas unidades llevaban su propio grupo electrogenerador, arrastrado por un motor diésel. Esta tendencia no se generalizó por los problemas de disponibilidad y fiabilidad que surgieron. Posteriormente, con la primera crisis de la energía a comienzos de los años setenta, durante la cual se produjo una elevación desproporcionada de los productos petrolíferos con respecto a las tasas generales de inflación, las empresas explotadoras se vieron forzadas a considerar los sistemas continuos de extracción, basados fundamentalmente en el transporte con cintas, debido a las ventajas económicas que ofrecía la energía eléctrica generada con otros combustibles más baratos, como el carbón.

2.6.1.1. Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto sufrió un importante impulso innovador, al seguir aportando más del 70 % de los pro-

ductos minerales en todo el mundo y la maquinaria que se empleaba creció tanto en tamaño, como en la mejora de la fiabilidad de sus componentes y automatización de funciones y mecanismo. Esta evolución se ha traducido en un incremento de los rendimientos, un mejor aprovechamiento energético, una mayor disponibilidad de la maquinaria y, en esencia, en un abaratamiento de costos.

Seguidamente se hace una breve descripción de los principales métodos que se aplican en minería de superficie, destacando las características que deben cumplir los yacimientos y algunos aspectos operativos de interés.

Cortas. En yacimientos masivos o de capas inclinadas la explotación se lleva a cabo tridimensionalmente por banqueo descendente, con secciones transversales en forma de tronco cónica. Este método es el tradicional de la minería metálica.

La extracción, en cada nivel, se realiza en bancos con uno o varios tajos. Debe existir un desfase entre bancos con el fin de disponer de unas plataformas de trabajo mínimas para que operen los equipos a su máximo rendimiento y en condiciones de seguridad. Las vías de transporte se adaptan a los taludes finales o en actividad, permitiendo el acceso a diferentes cotas.

El ataque al mineral se hace de techo a muro, como en cualquier otro método. En estas explotaciones se suele disponer de bancos en estéril de mayor altura que en el mineral.

Este grupo de métodos se caracteriza por su simplicidad, por la concentración de los trabajos y por la reducida distancia de transporte, tanto en horizontal como en vertical, permitiendo una fácil y económica restauración de los terrenos.

Terrazas. Este método se basa en una minería de banqueo con avance unidireccional. Se aplica a depósitos relativamente horizontales de una o varias capas o estratos de mineral, con recubrimientos potentes que obligan a depositar el estéril en el hueco creado, transportándolo alrededor de la explotación.

Contorno. En yacimientos semihorizontales y con reducida potencia, donde la orografía del terreno hace que el espesor del recubrimiento aumente considerablemente a partir del afloramiento del mineral, se realiza una minería conocida como de contorno. Consiste en la excavación del estéril y el mineral en sentido transversal hasta alcanzar el límite económico, dejando un talud de banco único, con progresión longitudinal siguiendo el citado afloramiento. Dado el gran desarrollo de estas explotaciones y la escasa profun-

dididad de los huecos, es posible hacer una transferencia de los estériles para la posterior recuperación de los terrenos.

Dentro de este grupo existen diversas variantes, en función de la secuencia de avance planteada y los equipos mineros empleados. De estos últimos los más utilizados son los tractores de orugas, las palas cargadoras, las excavadoras hidráulicas y las volquetas.

Dragado. En mineralizaciones especiales, como son las metálicas de oro, casiterita, etc., contenidas en aluviones, resulta interesante la aplicación del método de dragado, inundada previamente la zona de explotación.

Este método es económico cuando la propia agua de inundación se utiliza en el proceso de concentración, como ocurre con la separación gravimétrica. Las dragas, además del sistema de extracción que utilizan, cangilones, cabeza de corte, etc., incorporan la propia planta de tratamiento sobre la plataforma, cribas, ciclones, *jigs*, etc., capaces de tratar grandes volúmenes de material y de un sistema de evacuación de los estériles a la zona ya explotada.

2.6.1.2. Minería subterránea

Cámaras y pilares. Este método es conocido también con el término “*room and pillar*” y consiste en ir dejando secciones de mineral, como pilares, para mantener los huecos creados. Las dimensiones de las cámaras y la sección de los pilares dependen de las características del mineral y de la estabilidad de la roca caja, del espesor de recubrimiento y de las tensiones sobre la roca. El grado de aprovechamiento del depósito se da en función de las dimensiones de los macizos abandonados.

El mineral que queda como pilar puede recuperarse parcial o totalmente, reemplazando los pilares por otro material para el sostenimiento del techo, o puede extraerse en forma de retirada, abandonando los cortes para el posterior hundimiento del techo; caso contrario se da cuando los pilares con mineral se pierden.

El método se puede aplicar en cuerpos con buzamiento horizontal; normalmente no debe exceder los 60°, cuando el mineral y la roca encajante sean relativamente competentes; cuando los minerales no requieren clasificación en la explotación, y en depósitos de gran potencia y área extensa.

Tajos por subniveles. Este método es conocido también con el término “*sublevel stopping*” y consiste en dejar cámaras vacías después de la extracción del mineral. El método se caracteriza por su gran productividad debido a que las labores de preparación se realizan en su mayor parte dentro del

mineral. Para prevenir el colapso de las paredes, los cuerpos grandes normalmente son divididos en dos o más tajos; la recuperación de los pilares se lleva a cabo en la etapa final de minado. En este método, el minado se ejecuta desde los niveles para predeterminar los intervalos verticales. Los subniveles son desarrollados entre los niveles principales; el mineral derribado con taladros largos o desde los subniveles cae hacia la zona vacía y es recuperado desde los “*draw-point*” para luego transportarlo hacia la superficie.

Corte y relleno ascendente. El mineral se arranca por rebanadas horizontales, en sentido ascendente, desde la galería de fondo. Una vez volado se extrae completamente de la cámara, a través de unos coladeros, efectuándose a continuación el relleno del hueco creado con estériles, con lo que se consigue crear una plataforma de trabajo estable y el sostenimiento de las excavaciones.

El material de relleno puede ser el escombros procedente de las labores de preparación de la mina o el que con esa finalidad se extrae en la superficie de alguna cantera próxima y, una vez triturado, se mezcla con agua para transportarlo hidráulicamente por una tubería. Este material se drena para separar el agua, quedando así un relleno compacto. La consolidación puede aumentarse mediante la adición de una cierta cantidad de cemento.

La mayoría de las operaciones se han mecanizado casi totalmente, con lo que este método ha llegado a sustituir a otros hasta ahora muy utilizados. Las principales ventajas que presenta son la alta selectividad, la buena recuperación del mineral, la facilidad de aplicación y las condiciones de seguridad alcanzadas cuando los macizos rocosos no son competentes. Los inconvenientes que presentan son el costo del material de relleno, el tamaño limitado de las voladuras y las interrupciones en la producción, las cuales son necesarias para distribuir el material de relleno dentro de las cámaras.

2.6.2. Sistemas de beneficio

La recuperación de metales ha sido un desafío para el hombre, que se dio casi paralelamente con su evolución, por lo que se conocen muchas fases del conocimiento humano según el uso de los metales (o minerales): la Edad de Piedra, o un poco más evolucionados cuando se habla de la Edad de Hierro, de Cobre y de Bronce. El método más rudimentario sin duda ha sido la simple selección manual de los materiales de interés.

En la mayoría de operaciones metalúrgicas se hace necesaria una liberación de las partículas metálicas, para lo cual se deben efectuar operaciones de trituración y molienda, por lo general con equipos especialmente dise-

ñados y construidos para tal fin. Un factor determinante es el tamaño, el cual se obtiene de la liberación óptima de metales de interés; por eso este suele ser un factor crítico, pero al mismo tiempo el menos eficiente desde el punto de vista costo-beneficio de la energía usada.

Los métodos de concentración de minerales existen desde épocas inmemoriales, desde que el hombre comenzó a realizar minería. Una de las operaciones más antiguas para el aprovechamiento de los metales fue el método elemental de gravimetría, que se basa en la mayor densidad de los elementos metálicos frente a los materiales de ganga o minerales.

2.6.2.1. Gravimetría

Esta operación se basa en las características de diferencia de densidad de los elementos contenidos en materiales heterogéneos, es decir en el mayor peso, influenciados por la fuerza de la gravedad de un elemento con respecto a otros.

En el caso de la metalurgia del oro existen diversos equipos para realizar las operaciones de recuperación basados en principios gravimétricos, aunque siempre es importante la separación de las partículas gruesas de las finas; en el caso de los yacimientos aluviales se busca separar primero las rocas mediante el uso de rieles, cedazos, *trommels* y zarandas estáticas o vibratorias.

Los sistemas más usuales y rudimentarios para la recuperación de oro por gravimetría son las canaletas o canales, cuyo piso está recubierto con materiales fibrosos, detalle este que permite que las partículas libres de oro se concentren con la ayuda de la adherencia o la resistencia al flujo turbulento. Los materiales fibrosos más usuales suelen ser alfombras sintéticas o inclusive cobijas; es aconsejable poner trampas transversales sobre el piso de la canaleta.

Otros sistemas de recuperación gravimétrica se basan en el incremento de la gravedad por la aplicación de fuerza centrífuga, lo que multiplicado por la alta densidad de los metales preciosos permite que las densidades proyectadas tengan un mayor diferencial entre uno y otro elemento. Estos son los llamados equipos de medios densos, donde la fuerza es aplicada a equipos de formas cónicas, como los concentradores Falcon, Knudsen y Knelson, que son los más eficientes de todos en condiciones ideales. Es pertinente aclarar que la eficiencia de la concertación gravimétrica en estos equipos ocurre cuando las partículas de los metales están libres.

2.6.2.2. Amalgamación

Operación que se basa en la alta densidad de los metales valiosos y las fuerzas de tensión superficial sobre la super-

ficie del mercurio. Esta operación se basa en la alta afinidad del mercurio por el oro y la plata, aunque ciertamente es posible forzar amalgamación con otros elementos metálicos, como la formación de amalgamas para uso dental, en las que actualmente se usa zinc, o la frotación del mercurio en bandejas de cobre como planchas amalgamadoras.

Es un error considerar que una amalgama es una aleación, ya que una amalgama es una simple mezcla no homogénea de cualquier elemento metálico con el mercurio, metal que en condiciones normales de presión y temperatura es un líquido. Dicho lo anterior, y para mayor claridad, se destaca que es posible amalgamar partículas de oro tan gruesas como 1 mm a tal punto que, interiormente, dicha partícula seguirá siendo únicamente de oro, por lo que no es una aleación.

Esta es una operación contaminante muy difundida y que debería ser erradicada de las prácticas de recuperación de metales preciosos, además de ser muy costosa y deficiente. Adicionalmente en los últimos años la tendencia de precios ha sido hacia arriba, tornándose además en una operación cara, debido al cierre de algunas operaciones de mercurio como la mina de Almádena en España.

2.6.2.3. Flotación de minerales

Las operaciones de flotación, como un proceso de concentración, tienen como objetivo la recuperación de los metales de interés contenidos en un mineral, en forma impura pero al mismo tiempo enriquecida. Este tipo de operaciones se basan en las características hidrofóbicas de ciertos componentes de los minerales (típicamente el azufre) para que al introducir aire se formen burbujas (flotación por espumas); estas partículas de mineral se adhieren a las burbujas y flotan a la superficie donde son extraídas como concentrados.

La flotación muchas veces requiere cierta inducción por reactivos, aunque inicialmente era una operación recomendada solo para minerales sulfurados; hoy por hoy, y desde hace mucho tiempo, es posible hacer flotar minerales oxidados debido a la aplicación y uso de reactivos que dan características hidrofóbicas a los elementos de interés en la mena.

Los principales reactivos a usarse en las operaciones y procesos de flotación son, en forma genérica, los siguientes:

Depresores. Son reactivos que inhiben ciertos elementos a fin de que no floten durante la operación, para que se mantengan debajo de la línea de espuma. Este tipo de reactivos se usan en la flotación diferencial o selectiva, o simplemente para evitar que se sumen a los concentrados elementos indeseables.

Colectores. Contrariamente a los depresores, los colectores se usan para que los elementos valiosos puedan adherirse a la superficie de las burbujas, de manera tal que sean justamente los elementos concentrados como producto los que afloran a la superficie.

Espumantes. Este tipo de reactivos son aquellos que producen las espumas por el ingreso de aire, permitiendo la formación de burbujas lo suficientemente fuertes y estables. En general los reactivos a usarse, así como su dosificación, dependen de las características propias de cada mineral.

2.6.2.4. Fundición y tostación

Son procesos pirometalúrgicos cuyas aplicaciones se recomiendan en el caso de metales de alta ley y de concentrados diversos. En el caso de la tostación, este método se considera un proceso previo; se trata de un pretratamiento a efectos de que el mineral o concentrado se vuelva dócil a algún proceso de ataque químico con reactivos convencionales.

En la fundición los metales son colectados por fusión debida a altas temperaturas, concentrándose en el fondo del recipiente que los contiene, usualmente un crisol. La fundición en pequeña escala se aplica al oro físico obtenido por diversos procesos, lo que permite un refinamiento pero, además, permite homogeneizar el material como aleación, del oro y de sus impurezas.

2.7. Recursos, reservas y comercio

El oro ha cumplido un papel fundamental en la economía internacional, no solo desde el punto de vista ornamental sino monetario, a partir de la segunda mitad del siglo XIX una vez que Gran Bretaña adoptó como sistema monetario el “patrón oro”, hasta 1998, cuando Suiza decidió abandonar este sistema, convirtiéndose en el último país en hacerlo.

La situación mundial de las reservas de oro en los últimos 20 años se ha mantenido constante en un promedio de 45 000-55 000 toneladas métricas (tm); actualmente Australia es el país que más reservas de este mineral posee, con el 17 % de las reservas mundiales (USGS, 2017). En la figura 6 se observa la distribución de las reservas para el 2016 y en la tabla 3 se muestra la participación de los países en los últimos 20 años en las reservas de oro; se observan países que décadas atrás no tenían participación en la industria del oro como Perú, China y México, todo esto relacionado con el auge de las exploraciones geológicas de este mineral a inicios del siglo XXI.

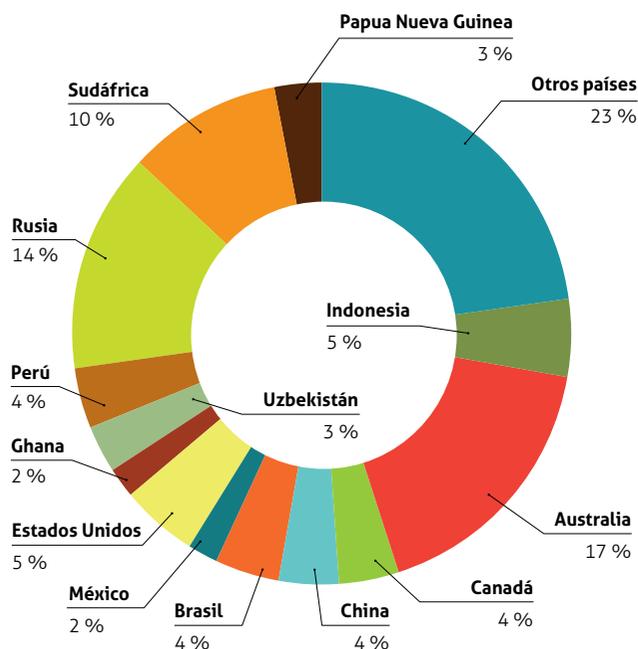


Figura 6. Participación de países en las reservas mundiales de oro

Fuente: USGS (2017)

Tabla 3. Estimación de reservas mundiales de oro durante el periodo 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	5600	5600	2700	3000	3000
Australia	3400	5000	5000	7400	9500
Brasil	800			2400	2400
Canadá	1500	1500	1300	920	2400
China		1000	1200	1900	2000
Ghana				1400	990
Indonesia		1800	1800	3000	3000
México				1400	1400
Papúa Nueva Guinea				1200	1500
Perú		200	3500	2000	2400
Rusia	3100	3000	3000	5000	8000
Suráfrica	19000	19000	6000	6000	6000
Uzbekistán	3000			1700	1700
Otros	9500	13000	17000	13400	13000
Total	45900	50100	41500	50720	57290

Fuente: USGS (2017)

La producción mundial de oro se ha multiplicado por cuatro en el último siglo, llegando a un pico de 3100 t en el 2016. Durante los años 2011 y 2016 la producción mundial aumentó en un 3.1 % (USGS, 2017), pasando de 2700 t en el 2011 a 3100 t en el 2016. En la figura 7 se observa la participación de los países en la producción de oro en el 2016:

se tiene a China con el 13 %, Australia con el 9 % y Rusia con el 8 %, como los tres principales productores de oro que suman el 33 % de la producción mundial.

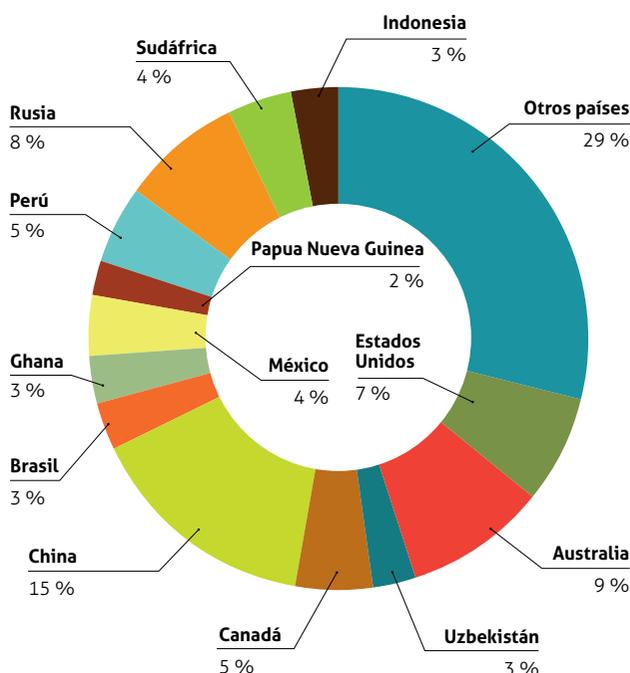


Figura 7. Participación mundial de la producción de oro en el 2016

Fuente: USGS (2017)

Cabe señalar que la producción mundial completa dos décadas en constante aumento, como se observa en la tabla 4, situación que se explica en gran medida por la demanda y el alza en los precios, los cuales se encontraban deprimidos antes del 2000; sin embargo, con los actuales niveles de producción, de no incrementarse las reservas estas se agotarían en dieciocho años, los países con mayor producción se relacionan en la figura 8.

Tabla 4. Producción mundial de oro en el periodo 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	325	350	260	237	209
Australia	285	290	260	270	270
Brasil	80			55	80
Canadá	160	160	120	110	170
China	150	185	240	355	455
Ghana				100	90
Indonesia		120	145	100	100
México				85	125
Papúa Nueva Guinea				70	65
Perú		140	210	150	150

(.../...)

(.../...)

País	1996	2001	2006	2011	2016
Rusia	120	155	162	200	250
Suráfrica	490	400	270	190	140
Uzbekistán	75			90	100
Otros	600	725	840	675	900
Total	2285	2525	2507	2687	3104

Datos en toneladas métricas

Fuente: USGS (2017)

La oferta de oro en el mercado internacional tiene como componente principal la producción minera, que alcanza un 80 % del total; el resto está representado en ventas oficiales y oro reciclado.

Desde el punto de vista de demanda por sectores, la principal actividad demandante de oro es la joyería, con una participación cercana al 75 %, seguida por el sector electrónico con aproximadamente un 7 % de la demanda; el tercer mayor demandante de oro es el atesoramiento de oro en barras.

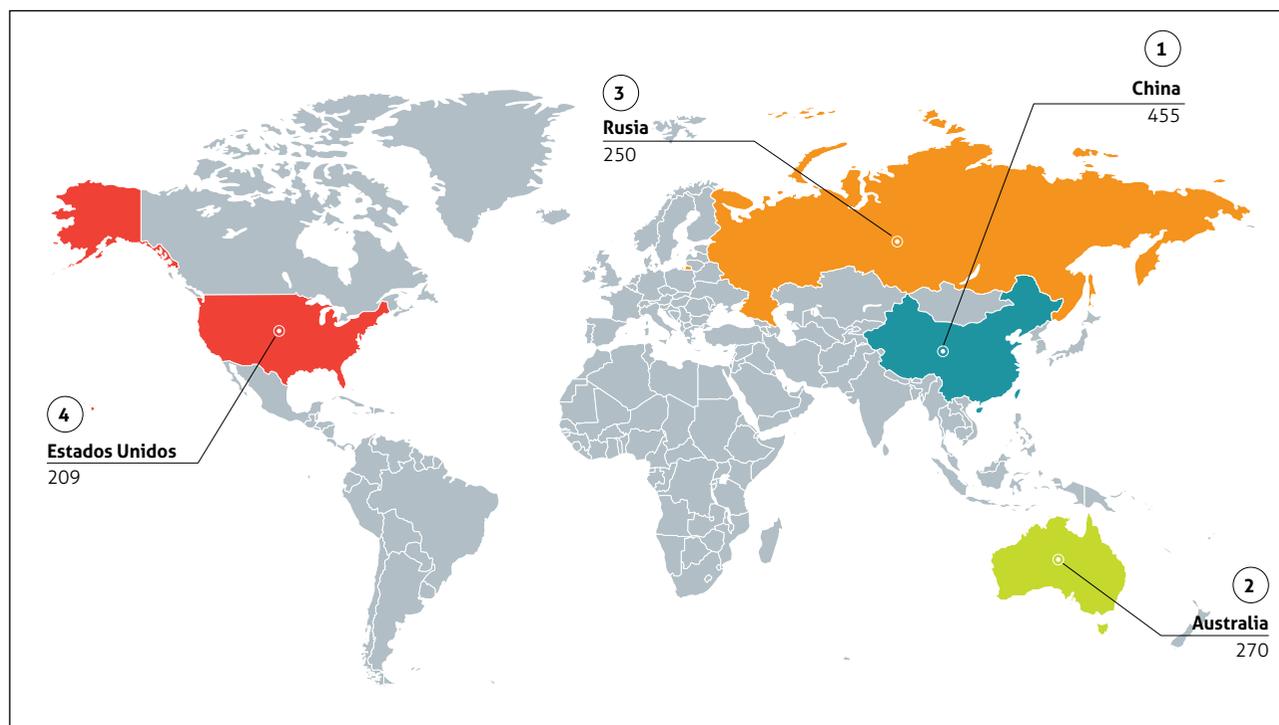


Figura 8. Producción mundial de oro en toneladas en el 2016

Fuente: USGS (2017)

2.8. Perspectivas

A continuación se presenta la curva de variación del precio internacional del oro en los últimos veinte años (figura 9), el cual se fija dependiendo de la situación del mercado; actualmente el precio del oro ronda los USD \$1246/Oz Troy, y durante los últimos quince años los precios han mantenido una tendencia al alza, alcanzando su máximo pico en el periodo 2010-2013 donde se registraron valores entre los USD \$1300-1800 /Oz Troy, registrándose como el periodo más alto del precio del oro en los últimos 150 años (Investing, 2017). Dicha alza ha propiciado el interés por la explotación de este metal precioso, hecho que se evidencia

en el aumento en la producción de oro tanto a nivel mundial como local. Se espera que los precios en los próximos años se mantengan constantes.

En cuanto al tema de exploración de nuevos blancos, la tendencia mundial en este aspecto ha tenido un descenso drástico en comparación con su pico más alto, que fue en el 2012, donde la inversión superó los USD \$20 000 millones con respecto a los USD \$6900 millones del 2016, lo que significa una caída de un tercio del presupuesto.

En la figura 10 se observa el comportamiento de la inversión en los últimos veinte años: destaca el incremento hacia el periodo 2007-2014, que se relaciona con el aumento del mismo periodo de los precios del oro a nivel mundial.

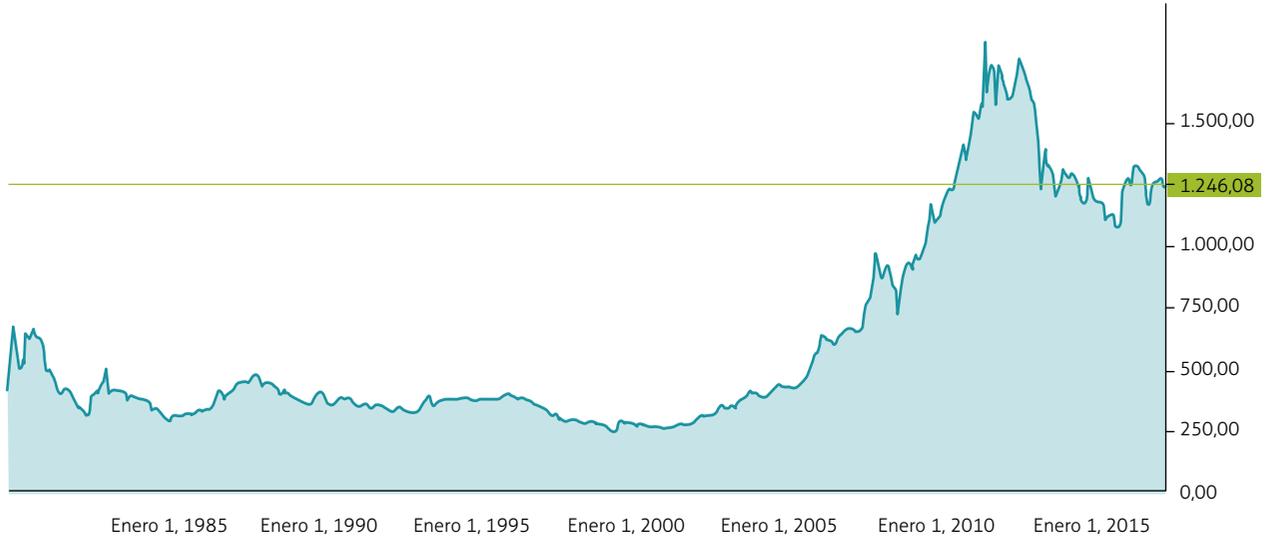


Figura 9. Variación de los precios internacionales del oro en los últimos veinte años (onza/dólar)

Fuente: Investing (2017)

A mediados del 2012 el clima de inversiones para el sector minero se puso especialmente e inequívocamente frío a medida que la incertidumbre política, económica y de los mercados continuaba obstinadamente complicada. En cuanto los efectos de la precaución y el descontento de los inversionistas se comenzaron a arraigar, las empresas continuaron recortando pronunciadamente sus presupuestos de exploración desde el 2013 al 2015, llevando a una baja del 39 %, con un total de USD \$8.77 mil millones

y registrando por primera vez una caída de USD \$10 mil millones en los presupuestos totales después del derrumbe financiero del periodo 2008-2009.

A pesar de algunas señales positivas en el 2016, el mayor financiamiento de las empresas junior y los precios más sólidos de los metales no fueron suficientes para que las empresas de exploración aumentaran sus presupuestos (S&P Global Market Intelligence, 2017).

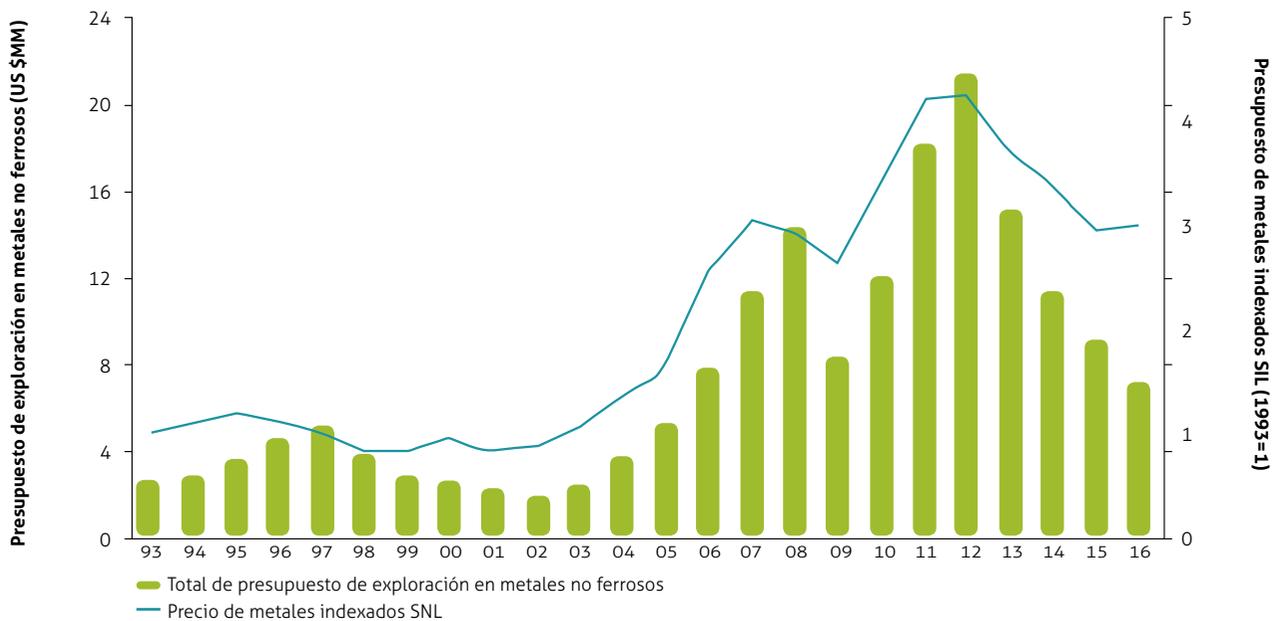


Figura 10. Presupuesto de exploración mundial de minerales no ferrosos

Fuente: S&P Global Market Intelligence (2017)

3. Oro en Colombia

Durante la Conquista y la Colonia los españoles se dedicaron a la búsqueda de nuevas fuentes de oro y a la explotación de las existentes, intensificando la exploración, aunque muchas de las regiones auríferas de esa época son las mismas de hoy en día. La fundación de ciudades, tales como Cali, Popayán, Anserma, Cartago, Santa Fé de Antioquia, Pamplona, Mariquita, Ibagué, Remedios y Zaragoza, fue consecuencia de la minería del oro (Fundación Universitaria Agraria, 2004).

Durante el siglo XVIII la actividad aurífera en Colombia llegó a tener tal importancia que la producción nacional alcanzó a representar el 25 % de la producción mundial, con Antioquia, Cauca y Panamá como los principales departamentos productores.

En 1940 el 55 % de la producción de oro estuvo a cargo de compañías extranjeras, el 15 % de empresas colombianas y el 30 % de barequeros, ya que en un 60 % la producción está relacionada con oro de aluvión.

La compañía Mineros de Colombia S. A. adquirió en 1974 los derechos de las empresas Frontino, Pato y Chocó Pacífico, dividiéndose posteriormente en las filiales Mineros de Antioquia, que asumió las operaciones de Zaragoza, Segovia, Remedios y el río Nechí, y Mineros del Chocó, que continuó laborando los aluviones del río San Juan.

Actualmente, entre el 10 y el 15 % de la producción lo generan cuatro empresas, consideradas las más grandes del país: Gran Colombia Gold, Grupo Mineros S. A. (antes Mineros de Antioquia), Continental Gold y Miner S. A.

3.1. Geología regional

El oro en Colombia se encuentra desde el Mesoproterozoico hasta el Reciente, donde los principales eventos metalogénicos son descritos en forma general por Buenaventura (2001, 2002), quienes a pesar de que las épocas metalogénicas aún no se han establecido con claridad, y menos en relación con los depósitos auríferos epigenéticos, describen una serie de eventos en el Bloque Norandino y el Cratón Amazónico.

Un primer evento metalogénico tuvo lugar en el Precámbrico, particularmente en el Proterozoico, en estrecha relación con la sucesión metasedimentaria del Cratón Amazónico, y a ella están relacionadas las mineralizaciones del área de las serranías de Naquén y Caranacoa, en el departamento de Guainía, y de la serranía de Taraira, en el departamento de Vaupés.

Un segundo evento metalogénico tuvo lugar durante el Triásico-Jurásico y es responsable no solo de las mineralizaciones auríferas tipo *skarn*, sino también de los depósitos epitermales de metales preciosos de tipo filoniano y disseminado; a esta segunda época están relacionadas las mineralizaciones de los batolitos de Segovia, Mocoa e Ibagué.

Un tercer evento sucedió durante el Cretácico, con la generación de corteza oceánica en un ambiente submarino a lo largo de una dorsal oceánica, en la que tuvo lugar la depositación de sulfuros masivos con cantidades apreciables de metales preciosos. A este evento se relacionan los prospectos de los departamentos del Chocó, Cauca, Valle del Cauca, Antioquia y Córdoba, así como también la generación de mineralizaciones relacionadas con el magmatismo calcoalcalino, como el de los batolitos Antioqueño y Sonsón.

Un cuarto evento metalogénico se produjo durante el Paleógeno, cuya expresión magmática calcoalcalina está representada por los batolitos de Mandé, Farallones, Acandí, Anchicayá y Piedrancha; durante este periodo tuvo lugar el desarrollo de pórfidos cupríferos con oro, además de yacimientos epitermales de metales preciosos de tipo filoniano y disseminado, que se encuentran en la Cordillera Occidental.

Una quinta época de mineralización ocurrió durante el Neógeno y está representada por actividad magmática calcoalcalina, conformada por plutones y *stocks* de tipo hipoabisal de composición dacítica y andesítica, que afectó a las tres cordilleras. Se encuentran varios sectores con mineralizaciones de tipo filoniano, como el sur de Bolívar, Marmato-Supía-Riosucio, Frontino, Dabeiba, Anzá, Suárez, Ginebra, Diamante-Bomboná-Paraíso, Cajamarca-Bolívar y California-Angostura-Vetas.

En Colombia el oro está localizado geográficamente en la región amazónica; en las cordilleras Oriental, Central y Occidental; en los valles del Magdalena y del Cauca, y en la costa Pacífica. (figura 11). Con base en estos trabajos se hará la descripción de las diferentes zonas auríferas y su relación con las regiones geográficas, de oriente a occidente.

3.1.1. Cratón Amazónico

En la región geográfica oriental, el oro está localizado en rocas metamórficas, sedimentarias y metasedimentarias, además de los aluviones recientes que cubren el Cratón Amazónico, distribuidos en los departamentos de Guainía, Vichada y Vaupés (Renzoni, 1990). Las rocas metamórficas que afloran en el área están agrupadas en el Complejo

Mitú, y las sedimentarias y metasedimentarias en el Grupo Tunuí (Renzoni, 1990).

El Complejo Mitú está conformado por neises, migmatitas, metagranitos y metagranodioritas de edad Mesoproterozoico, que se encuentran en complejidad estructural intensamente deformados, intruidos por granitoides de edad Mesoproterozoico.

El Grupo Tunuí está conformado por metarenitas, metaconglomerados y filitas en facies de esquistos verdes, intensamente tectonizadas y replegadas durante el Mesoproterozoico (Renzoni, 1990).

3.1.2. Bloque Norandino, dominio continental

El Bloque Norandino está integrado por una serie de terrenos, provincias o dominios de diferente composición litológica y edad adosados a la margen noroccidental del Cratón Amazónico, a partir del Neoproterozoico. Esta región se encuentra conformada por las cordilleras Oriental, Central y Occidental. El Macizo de Santander es la única región de la Cordillera Oriental donde se conocen yacimientos de oro primario. Las rocas asociadas con la mineralización son rocas ígneas (granodioritas), de edad Jurásico y Terciario, que intruyen metamorfitas del Mesoproterozoico y del Paleozoico.

En la Cordillera Central los intrusivos se distribuyen desde los departamentos Nariño y Putumayo, en el extremo sur, hasta Antioquia y Bolívar al norte. Los principales son batolitos y *stocks* de composición predominante granodiorita de edades Jurásico y Cretácico, y en menor extensión rocas hipoabisales y volcánicas del Paleógeno y Neógeno. Como rocas encajantes principales se presentan esquistos negros y verdes de edad Paleozoico, y vulcanitas continentales y calizas del Triásico.

La actividad magmática en esta provincia originó filones hidrotermales, yacimientos metasomáticos y algunos disseminados. Se reconocen tres zonas:

3.1.2.1. Zona Segovia-San Lucas

Correspondiente a la parte norte de la cordillera, es la región con el mayor potencial aurífero del país. Comprende el noreste de Antioquia y el sur de Bolívar, entre las fallas de Otú y Mulatos, y registra eventos magmáticos desde el Jurásico hasta el Paleógeno que se relacionan con yacimientos de filón (Zaragoza, Segovia), con rocas de caja ígneas, metamórficas y sedimentarias; en esta zona se localizan los mayores placeres auríferos (Bagre, Nechí, Cuturú, Cacerí), y se presentan algunas mineralizaciones aisladas de oro disseminado (Salinas, Lozano y Solano, 1999).

3.1.2.2. Zona Antioquia-Sonsón-Silvia

Se destaca la parte central de Antioquia, Caldas y norte del Tolima. Los eventos magmáticos que se le relacionan son en su mayoría de edades Cretácico y Paleógeno, y algunos Neógeno; además ocurren yacimientos de oro de filón y algunas mineralizaciones disseminadas. Las masas intrusivas, sobresalientes por tamaño y relación genética con los yacimientos, son los batolitos de Mocoa, Ibagué, El Bosque, Sonsón, Antioquia y Segovia, fuera de algunos *stocks* (Payandé, Manizales).

3.1.2.3. Zona Ibagué-Mocoa

Se extiende entre los límites con Ecuador y la falla de Ibagué. En ella se presentan eventos magmáticos de edades Jurásico y Cenozoico. Los intrusivos de mayor tamaño son los batolitos de Ibagué y Mocoa, ambos de composición cuarzomonzonita a granodiorita; las mineralizaciones son de filón y estoverca, pero relativamente escasas en comparación con las otras dos zonas. En esta zona se encuentra localizado el pórfido cuprífero de La Colosa (Cajamarca); también hay prospectos disseminados tipo porfirítico en El Pino y Mocoa, y se han explotado algunos depósitos pequeños de tipo *skarn*.

Los cuerpos plutónicos y las rocas encajantes tienen control estructural regional, con orientación general noreste-suroeste y fracturas en diferentes direcciones, donde predominan las noreste-suroeste y las noroeste-sureste; las primeras son fallas normales y diaclasas formadas por distensión, y las segundas son zonas de cizalla que coinciden con la orientación de la traza de los principales sistemas de fallas del país. Las rocas ígneas, asociadas con la mineralización primaria, presentan una composición que varía entre félsica e intermedia, y se presentan en cuatro rangos de edades: Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno.

En la zona integrada por la Sierra Nevada-La Guajira se reportan dos explotaciones de oro de filón hidrotermal del Neógeno y unas pocas de aluvión (Salinas, Lozano y Solano, 1999). Este dominio presenta condiciones geológicas comparables al Macizo de Santander.

3.1.3. Bloque Norandino, zona de transición entre el dominio continental y el dominio oceánico

Cauca-Romeral. Corresponde a una franja de unos 50 km de ancho en promedio que se encuentra entre los sistemas de fallas de Cauca y Romeral, e integra terrenos de dominios continental y oceánico. Allí se presentan rocas intrusivas (diques, *stocks*, batolitos) de edades Cretácico, Paleógeno y Neógeno, de composición félsica a interme-

dia (Ingeominas, 2006). De acuerdo con Salinas, Lozano y Solano (1999), la mayor parte de las mineralizaciones de oro y plata, las cuales son de tipo vetiforme, diseminada y en estoverca, están relacionadas con los eventos magmáticos subvolcánicos del Neógeno.

Entre las regiones más importantes están Marmato, Ginebra-Bolívar, San Pablo, Ancuyá, El Tambo-El Bordo, Fredonia-Titiribí y Mistrató.

3.1.4. Bloque Norandino, dominio oceánico

Oceánico occidental. Integrado por la Cordillera Occidental, la serranía del Baudó y la llanura del Pacífico, define una franja localizada entre el litoral pacífico y el sistema de fallas de Cauca. Este se ha interpretado como una porción de litosfera oceánica acrecionada a la placa continental de Suramérica, probablemente durante el Neógeno.

En este dominio se presentan cuerpos intrusivos de composición félsica a intermedia (dacitas, riódacitas, cuarzodioritas) de edades Paleógeno y Neógeno (Ingeominas, 2006), entre los que se encuentran los batolitos del Darién, Mandé, Anchicayá y un conjunto de plutones localizados en los Farallones del Citará, el páramo de Frontino, Morro Pelao, Morro Gacho, Cerro Plateado, Tamaná y Piedrancha.

Está compuesto por un basamento máfico de intraplaca oceánica que subyace a una secuencia volcano-sedimentaria de edad Cretácico Inferior, conformada por metadiabasas y metasedimentitas (*chert*, calizas silíceas, limolitas y areniscas tobáceas), con metamorfismo de bajo grado.

La región ubicada al norte de la falla de Garrapatas está conformada por el Grupo Cañas Gordas y corresponde a la zona Mandé-Farallones. Los plutones e intrusivos subvolcánicos relacionados con las mineralizaciones primarias son en su mayoría del Neógeno, con algunos de edad Paleógeno, y los yacimientos son de filón en más de un 90 %; los restantes son en estoverca y estrato confinados. En esta zona son muy importantes los placeres platinoauríferos.

La porción ubicada al sur de la falla de Garrapatas corresponde al grupo Dagua e integra la zona Anchicayá-Piedrancha. Allí también los plutones e intrusivos subvolcánicos relacionados con las mineralizaciones primarias son en su mayoría de edad Neógeno y de tipo filoniano. Uno de los aspectos diferentes, con respecto a la zona norte, es la ausencia de placeres platiníferos.

3.1.5. Tipos de depósitos en Colombia

En Colombia se explotan o se han explotado yacimientos de placeres auríferos, placeres platino-auríferos, filones y vetas, *skarns* y sulfuros masivos, y existen proyectos

identificados de tipo pórfido y prospectos interesantes de paleo-placeres asociados con fuentes termales.

3.1.5.1. Placeres auríferos

Este tipo de yacimiento se presenta en sedimentos aluviales detríticos de cauce, llanura de inundación y terrazas bajas de edad Holoceno, y en terrazas altas y laderas de edades Plio-Pleistoceno y Neógeno. Los aluviones están conformados principalmente por gravas arenosas con lodos, donde los más antiguos presentan mayor cohesión, con espesor variable de pocos metros a 30 o 40 m, sobre un sustrato rocoso.

El oro nativo en los depósitos proviene del lavado de materiales litológicos del Proterozoico (formaciones Maimachi y Tunuí del Cratón Amazónico), de rocas sedimentarias continentales del Cenozoico, mineralizaciones de filón y diseminaciones contenidas en todas las rocas huéspedes que conforman el Bloque Norandino.

El oro se encuentra en estado nativo, fino (polvo) o en *nuggets*, con tenores variables entre 100 y 700 mg/m³, aunque en pocas ocasiones supera un gramo de Au por metro cúbico.

Los principales placeres están localizados en el bajo Cauca y en los ríos Nechí, Porce y Anorí, en lo que corresponde a la zona Segovia-San Lucas; otras fuentes auríferas importantes están en los ríos La Miel y Samaná (Antioquia), y Saldaña (zona Ibagué-Mocoa).

Placeres aluviales de cierta importancia se localizan en los ríos Patía, Iscuandé, Tapaje y Naya (zona Anchicayá-Piedrancha); en las cencas del río San Juan en el Chocó, en Cuiari (Guainía), Taraira (Vaupés), y aluviones de corrientes que drenan las serranías de Naquén y Caranocó en Guainía.

Las zonas de prospectos para placeres y paleoplaceres se localizan en los departamentos de Guainía y Vaupés, en la frontera con Brasil, en las serranías de Naquén, Caranocó y Taraira, y están asociadas con metaconglomerados y metareniscas de edad Mesoproterozoico del Cratón Amazónico, los cuales parecen tener características comparables con los yacimientos de Witwatersrand en Suráfrica.

En la serranía de Naquén se detectaron entre siete niveles conglomeráticos con metamorfismo de bajo grado, en el Grupo Tunuí (edad Mesoproterozoico), donde el oro ocurre en la matriz constituida por un 95 % de cuarzo y un 5 % de líticos; los clastos tienen tamaños hasta de 84 cm; también se detectaron fallas geológicas en dirección noroeste y noreste, y una meteorización muy profunda que enmascara las concentraciones de oro en la roca (Renzoni, 1990).

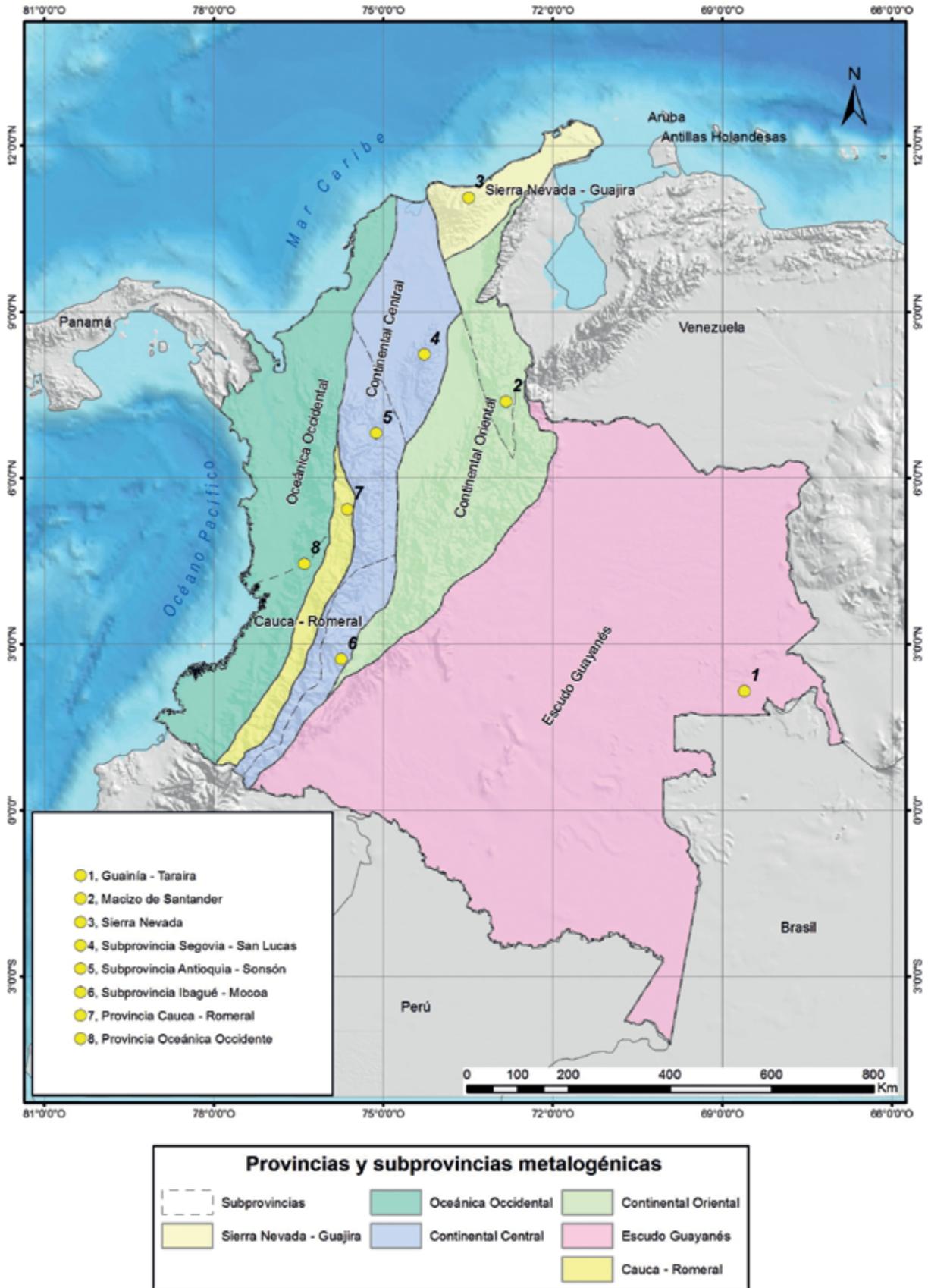


Figura 11. Zonas auríferas y relación con provincias metalogénicas

Fuente: Salinas, Lozano y Solano (1999)

El oro se presenta en estado libre en laminillas dobladas y deformadas que llenan los intersticios entre los granos, que en sectores corresponden a pirita. La geología de los yacimientos tiene semejanza con los yacimientos de Witwatersrand en Suráfrica, Blind River en Canadá y cerro Jacobina en Brasil.

3.1.5.2. Placeres auríferos y platiníferos

En estos depósitos la minería es principalmente de platino y oro, y está concentrada en los municipios de Acandí, Bagadó, Tadó, Condoto, Istmina, Nóvita, Sipí, Lloró y Quibdó en el departamento del Chocó; los aluviones de corrientes drenan el flanco occidental de la Cordillera Occidental: los ríos Atrato y San Juan, y sus afluentes mayores.

3.1.5.3. Yacimientos de filón

La mayoría de los yacimientos filonianos carecen de estudios detallados para poder relacionarlos con algunos de los modelos de depósitos minerales, aunque espacialmente estén asociados a cuerpos intrusivos; solo en algunos de ellos se ha podido definir características epitermales tal vez de alta y baja sulfuración, y mesotermiales (orogénicos) de manera muy general. Según Castro y Lozano (1995), los yacimientos hidrotermales en Colombia son en su mayoría de tipo cuarzo-adularia, y unos pocos son de tipo sulfato ácido.

Los más importantes están distribuidos por toda la región Andina, particularmente en la zona Segovia-San Lucas, en la Cordillera Central, donde los relacionan con eventos magmáticos de edades Jurásico y Paleógeno. Yacimientos filonianos también se explotan en la Cordillera Oriental, específicamente en el Macizo de Santander, en la zona Antioquia (Cordillera Central) y en la zona Piedrancha-Anchicayá (Cordillera Occidental).

Los filones tienen diversas orientaciones, pero las tendencias que predominan son noroeste-sureste y noreste-suroeste, ambas con espesores entre 0.4 y 2.5 m, y en casos excepcionales se mencionan de 5 a 6 m. Esta orientación preferencial de los filones es de carácter regional, lo cual sugiere que dicho control estructural es de origen tectónico y relacionado con la configuración tectónica del Bloque Norandino.

Las regiones con yacimientos filonianos que tienen aún alguna importancia se localizan en los municipios de Segovia y Remedios, en el nororiente del departamento de Antioquia, y la serranía de San Lucas, en el sur del departamento de Bolívar.

Otras regiones con minería de filón de cierta trascendencia son Vetas-California, en el departamento de San-

tander; Santa Isabel-Líbano-norte de Ibagué, en el Tolima, y Santa Cruz, en Nariño, en la zona Anchicayá-Piedrancha.

Entre las minas de mayor tradición se destacan El Silencio (municipio de Segovia), El Limón (municipio de Zaragoza) y La Bramadora (municipio de Guadalupe), en el departamento de Antioquia; Vetas (municipio de California), en el departamento de Santander; Marmato (municipio de Marmato), en el departamento de Caldas; La Equis (municipio de Quibdó), en el departamento del Chocó, y El Diamante (municipio de La Cruz), en el departamento de Nariño. Actualmente está en etapa de desarrollo el proyecto de la mina San Ramón de Red Eagle Mining localizado en el municipio de Santa Rosa (Antioquia), que es considerado uno de los nuevos proyectos de importancia para el país.

3.1.5.4. Yacimientos tipo *skarn*

Hace algunos años la empresa chilena Boliden Minera explotó el yacimiento Mina Vieja, en el municipio de Payandé (Tolima), para beneficiar cobre, con oro y plata como subproductos. Este depósito se encuentra incluido en la zona Ibagué-Mocoa, en la Cordillera Central.

La mineralización está asociada con procesos metasomáticos debidos a la intrusión en calizas del *stock* de Payandé, de edad Jurásico. La mina El Sapo es otro yacimiento del mismo tipo que fue objeto de explotación a baja escala.

3.1.5.5. Yacimientos de sulfuros masivos

El único yacimiento conocido es el proyecto El Roble, localizado en el municipio de El Carmen, departamento del Chocó, en la Cordillera Occidental (sector norte). La mineralización se encuentra hospedada en secuencias de basaltos oceánicos y rocas metasedimentarias de corteza oceánica.

3.1.5.6. Pórfidos cupríferos

Ingeominas ha localizado prospectos de yacimientos diseccionados bastante importantes, entre los que se destacan los ubicados en los municipios de Murindó (Antioquia) y Acandí (Chocó), donde la mineralización se encuentra asociada con rocas hipoabisales de edad Paleógeno, las cuales intruyen rocas basálticas, volcano-sedimentarias y dioritas.

Otro prospecto para investigar se localiza en el páramo del Pismo, en el municipio de Silvia (Cauca), donde se detectaron anomalías geoquímicas y electroquímicas en Au y metales básicos (Orrego, 1982; Vergara y Aucott, 1984).

Adicionalmente, a raíz de las campañas de exploración realizadas por empresas multinacionales como Anglo Gold Ashanti, Ventana Gold, Greystar Resources,

Medoro Resources y B2 Gold, entre otras, se ha reportado el hallazgo de nuevos blancos en las cordilleras Central y Occidental, principalmente, como La Colosa en Cajamarca (Tolima).

3.1.5.7. Fuentes termales

El prospecto aurífero El Piñal parece corresponder a una mineralización de tipo *Hot Spring* (Castro y Lozano, 1995). Está ubicado en la serranía de San Lucas, en el departamento de Bolívar, y lo asocian con fuentes termales de volcanismo ácido.

3.1.5.8. Brechas hidrotermales

Una de las regiones con buenas perspectivas involucra un amplio sector entre Cajamarca (Tolima), Salento (Quindío) y Manizales. La mineralización es diseminada, asociada con apófisis de pórfidos dacíticos de edad Neógeno (Lozano y Pulido, 1987), entre las que se destacan San Antonio y El Gallinazo.

San Antonio se localiza al occidente del municipio de Cajamarca, donde hubo una explotación a cielo abierto en la zona de oxidación, que contiene oro muy fino + pirita (2 %) + cuarzo, y con cantidades menores de calcopirita, arsenopirita, pirrotina, molibdenita, cinabrio y estibina (Pulido, 1998). La mineralización se disemina en venillas y estoverca dentro de zonas de falla en esquistos del Complejo Cajamarca, de edad Paleozoico, cerca de diques y *stocks* de pórfidos dacíticos y andesíticos.

El Gallinazo se ubica en el municipio de Manizales. La mineralización se presenta en forma de diseminación y en estoverca, ocasionalmente brecha, con venillas de cuarzo y pirita, relacionada con un *stock* subvolcánico del Cenozoico. La roca huésped es un pórfido dacítico-andesítico argilizado. Presenta alteración hidrotermal de cuarzo, caolín, sericita y feldespato de potasio (Pulido, 1985).

Otras zonas con presencia de brechas hidrotermales son Vetas-California, en el Macizo de Santander, y Miraflores.

3.2. Geología local

La localización de las principales zonas productoras y zonas potenciales para oro en Colombia se muestra en la figura 12; estas se describirán de acuerdo con la región en que se encuentren, y de oriente a occidente, como se hizo al principio en el contexto regional.

3.2.1. Cratón Amazónico

En esta provincia se localizan mineralizaciones auríferas en las serranías de Naquén y Taraira, las cuales se encuen-

tran ubicadas cerca de la frontera con Brasil. En esta zona, situada en la región oriental (figura 12), se presentan dos sitios con explotaciones de oro: serranía de Naquén (Guainía) y serranía de Taraira (Vaupés).

Las mineralizaciones auríferas en la serranía de Naquén, según Buenaventura (2002), son de cuatro tipos: 1) placeres fósiles, relacionados con metasedimentita de carácter conglomerático de edad Proterozoico; 2) oro de origen bioquímico, asociado con metapelitas ricas en materia orgánica; 3) vetas y venillas de cuarzo con oro, de origen hidrotermal, encajadas predominantemente en las metasedimentitas, y 4) placeres recientes, derivados de la erosión de los depósitos mencionados con anterioridad.

El oro se explota en coluviones y aluviones del río Cuiari, situado en la parte sur de la serranía de Caranocoa; también en los caños Tigres y San Nicolás, afluentes del río Guainía, y en las quebradas y caños que drenan la serranía de Naquén. Las explotaciones se realizan de manera artesanal y su producción es relativamente baja.

En el estudio de la categorización de reservas del distrito aurífero de Taraira, llevado a cabo en 1997, se presentan unos estimativos de reservas probables para las áreas del Amarillal-Cerro Rojo y Peladero, ubicadas en la serranía de Machado, de 43 t de oro en un área de yacimiento de 500 m de ancho y 5 km de largo, asumiendo una capa de 2 m con tenor promedio de 0.2 g de oro por tonelada para explotar a cielo abierto, y reservas posibles por 430 tm (Cuellar, 1997)

3.2.2. Bloque Norandino, dominio continental

En esta zona se ubican las regiones más productoras de oro en Colombia. A continuación se hace una descripción de cada una de ellas.

3.2.2.1. Zona Vetas-California

Esta mineralización se localiza en el municipio de California, a 40 km al noreste de Bucaramanga, departamento de Santander (figura 12). Se conoce desde la Colonia y su explotación ha sido para oro y plata.

Geológicamente se ubica en el Macizo de Santander, que está conformado por neises, esquistos y migmatitas; intrusivos de cuarzodiorita a granito de edad Jura-Triásico, y rocas hipoabisales porfiríticas dacíticas y andesíticas del Cenozoico.

Los filones mineralizados emplazan las rocas ígneas y metamórficas, en dirección predominante noreste-suroeste, y son controlados por fallas de alto ángulo y sistemas de diaclasas; varios filones mineralizados en dirección noroeste-sureste tienen como principal roca huésped rocas porfiríticas hipoabisales.

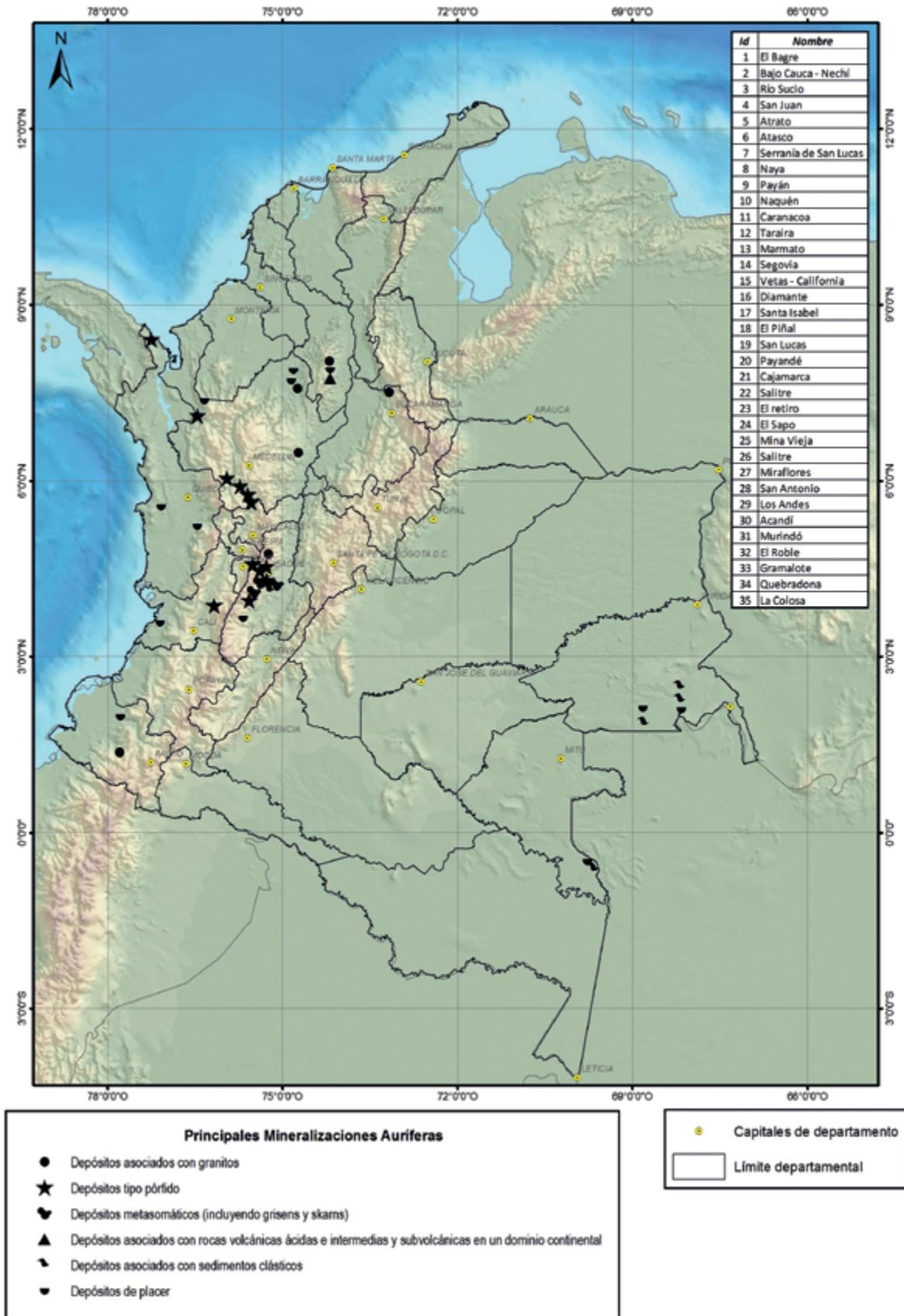


Figura 12. Principales mineralizaciones auríferas en Colombia

Fuente: Recopilación los autores

La mineralización consta de oro nativo muy fino, pirita + galena + esfalerita + tetraedrita + marcasita + arsenopirita ± calcopirita ± enargita ± estibina ± arsenopirita, en ganga de cuarzo; en algunas minas se presentan trazas de uraninita.

Como minerales de alteración hipogénica se reconocen biotita, epidota ± sericita ± clorita ± cuarzo y arcilla; la alteración supergénica es arcilla, adularia, alunita, algo de sericita, cuarzo gris y probablemente clorita (Mendoza y Jaramillo, 1979).

En California las características son de filones poli-metálicos epitermales de alta y baja sulfuración. Algunos datos compilados muestran contenidos de oro entre 10 y 40 g/t y una relación Au:Ag en uno de los filones de 1:5.

En esta área la empresa Ecooro, antes Greystar Ltd., llevó a cabo en el sitio La Angostura un proyecto de exploración para oro y plata desde 1995. La Angostura forma parte de un cinturón epitermal caracterizado por la asociación de oro con plata, cobre, arsénico, bismuto, molibdeno y telurio. La alteración en las estructuras de venas está dominada por sílice, tanto en forma de cuarzo como de silicificación, y sericita, mientras que la roca huésped está fuertemente argilizada. Las estructuras mineralizadas pueden ser venas simples, pero a menudo se encuentra en varias venas poco espaciadas; la mayor parte de la mineralización muestra valores menores de 2 g/t y tiene buena continuidad en las venas; los contenidos de plata son bajos, con promedios entre 6 y 7 g/t (Ecooro, 2017).

3.2.2.2. Zona Sierra Nevada-La Guajira

Situada en los departamentos de Atlántico, Cesar y La Guajira, solo ha ocurrido una etapa conocida de mineralización de oro en veta en el Neógeno; también se mencionan placeres aluviales de oro, probablemente derivados de la mineralización anterior (Salinas, Lozano y Solano, 1999).

3.2.2.3. Zona Cordillera Central

Es la más importante en producción de oro en el país. Se encuentra ubicada geológicamente entre el sistema de fallas Cauca-Romeral al oeste y por los sistemas de fallas de Suaza-Prado, La Plata, Cucuana, Pericos y Mulatos al este; corresponde a un ambiente de corteza continental, aunque a veces se encuentran fragmentos de corteza oceánica emplazados tectónicamente. Presenta épocas de metalogénesis en el Jurásico, el Cretáceo, el Paleógeno y el Neógeno, que dan origen a la mayor parte de los depósitos existentes (Salinas, Lozano y Solano, 1999).

En esta zona se presentan los sectores comprendidos por Segovia-San Lucas, denominado comúnmente sur de

Bolívar; Antioquia-Sonsón-Silvia, e Ibagué-Mocoa. Aquí solo se describirá lo correspondiente al departamento de Bolívar, pues la región noreste de Antioquia se reseñará en Antioquia central.

Sur de Bolívar. Es la zona de mayor producción de oro de filón del país, aunque allí también se encuentran explotaciones de oro en placeres (figura 12). Está ubicada en la serranía de San Lucas, parte sur del departamento de Bolívar.

En el área de San Lucas afloran neises cuarzo-feldespatíticos, anfibólicos y biotíticos de la facies anfibolita granulita; estas rocas, de edad Precámbrica, se denominan Neis de San Lucas. También se encuentran sucesiones volcánicas, constituidas por una alternancia de tobas cristalinas y líticas, arenitas y lodolitas tobáceas, lavas dacíticas, andesíticas y riolíticas consideradas de edad Jurásico. Las rocas anteriores están intruidas por cuerpos granodioríticos de color gris a gris rosado, con textura fanerítica, grano medio a grueso compuesto por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y biotita; se encuentran variaciones a cuarzodiorita, granito y monzogranito. Por su relación con las rocas anteriores, se les da edad Jurásico Tardío (Ingeominas y UIS, 2005).

La mineralización, contenida en filones hidrotermales, está relacionada con las rocas ígneas básicas a intermedias de edad Jurásico. En la franja entre San Martín de Loba, Río Viejo y Barranco de Loba, Muñoz (1993) describe las características geológicas, estructurales y mineralógicas de los asentamientos mineros de San Martín de Loba, Barba-coas, Los Cielos, Mina Seca, La Nigua, La Mina, Las Marías y otras.

Además de los depósitos de filones, en el área se encuentran explotaciones de placeres aluviales de oro a lo largo de los ríos que la drenan. También es necesario mencionar la explotación de suelos y saprolitos que se encuentran encima del intrusivo mineralizado.

Antioquia-Sonsón-Tolima. En esta zona se incluye la región oriental de Antioquia; corresponde a un ambiente de corteza continental principalmente, aunque en ocasiones se encuentran fragmentos de corteza oceánica emplazados en forma tectónica (Salinas, Lozano y Solano, 1999).

La región central de Antioquia corresponde a una extensa área en la que la mineralización se encuentra asociada con el Batolito Antioqueño, cuya composición es granodiorítica y edad Cretácica. Es esencialmente minería de filón, en su gran mayoría a pequeña escala. Involucra los municipios de Amalfi, Anorí, Angostura, Alejandría, Belmira, Briceño, Cisneros, Gómez Plata, Guadalupe, Maceo,

San Carlos, San Rafael y Santa Rosa, Titiribí, Yalí, Yarumal y Yolombó. Los filones auríferos se encuentran dentro del plutón o en la roca encajante cerca del contacto, y se clasifican como relacionados con intrusivos (*Intrusive Related*), orogénicos y epitermales.

Entre las minas de mayor tradición, por ser o haber sido fuentes importantes de oro, se encuentran La Brama-dora y La Concha en el municipio de Guadalupe; Berlín en Yarumal; El Zancudo en Titiribí, y La Trinidad, La Italia y El Violín en Amalfi (figura 13).

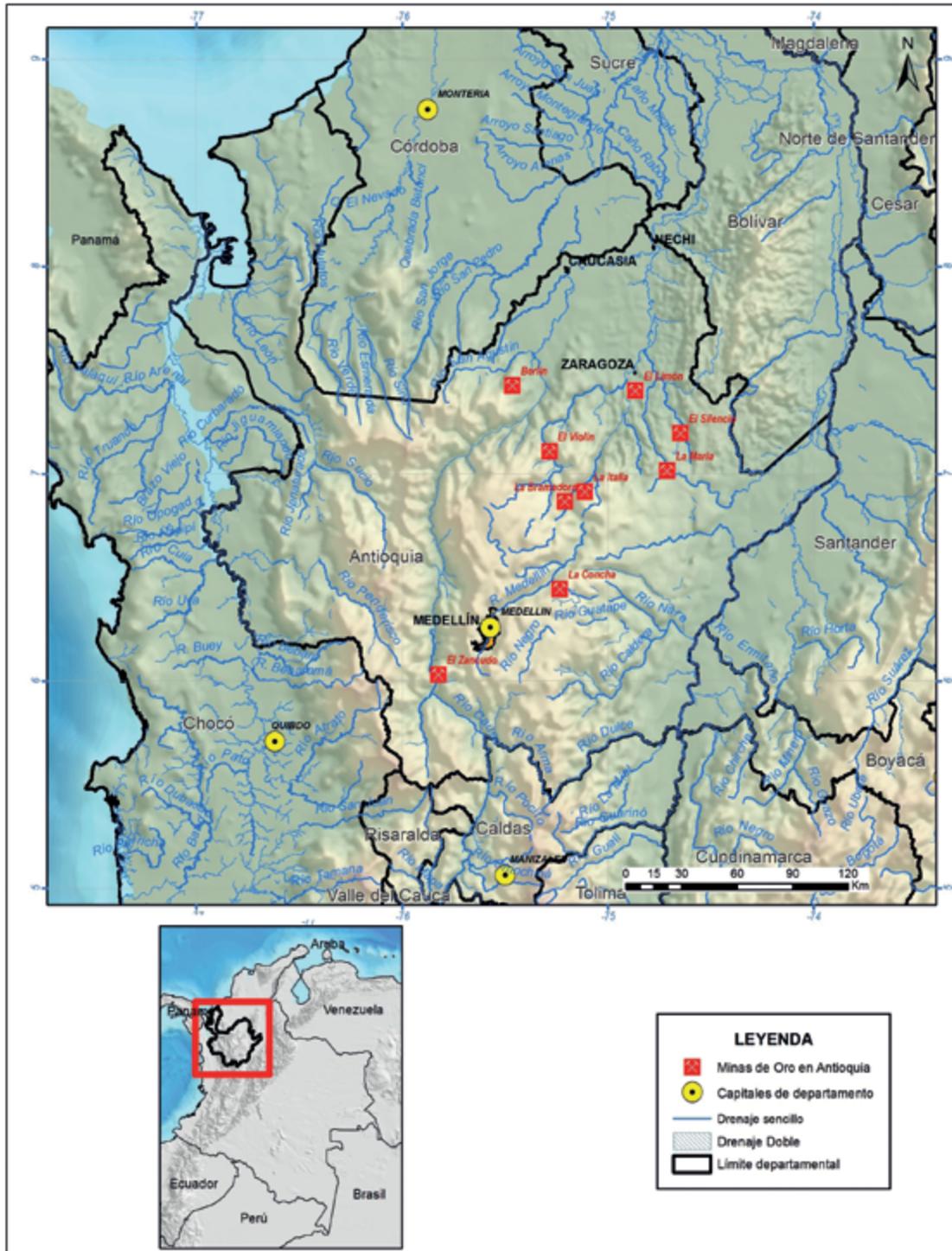


Figura 13. Minas de oro de mayor tradición en Antioquia

Fuente: González (2001)

Mina La Bramadora. Se localiza cerca de la carretera a Anorí, en la margen izquierda del río Porce. La roca encajante son metalimolitas y la mineralización se compone de oro nativo, pirita, esfalerita, pirrotina, arsenopirita, galena y calcopirita, diseminadas en ganga de cuarzo.

Mina El Zancudo. Se localiza en Titiribí; los filones de cuarzo aparecen en zona de falla entre esquisto y conglomerado. Los minerales presentes en los filones son oro libre, pirita, esfalerita, galena, tetrahedrita y proustita.

La región nororiental de Antioquia, junto con la serranía de San Lucas, es la mayor región aurífera de Colombia, tanto en minería de filón como en minería de aluvión. En minería de filón se encuentra el distrito Segovia-Remedios, que conforma un importante distrito minero en los municipios con estos nombres. En el área afloran rocas metamórficas del Neoproterozoico a Cámbrico de facies esquistos verdes, y rocas plutónicas félsicas del Pérmico, intermedias del Triásico-Jurásico y ácidas del Cretáceo (Ingeominas, 2006).

La mineralización primaria son filones auríferos con sulfuros de hierro, plomo, cobre y zinc, en ganga de cuarzo, ubicados al oriente de la falla de Otú, que lleva una dirección general N25°W, donde la roca huésped es el Batolito de Segovia, y al este, donde la roca encajante es metamórfica (Rodríguez y Pernet, 1983). Las mineralizaciones están controladas al parecer por dos causas: esfuerzos tectónicos originados por la falla de Otú y esfuerzos de tensión generados por el enfriamiento del plutón cuarzodiorítico de Segovia (Oquendo, 1970). Las principales minas de filón son El Silencio y El Limón (figura 13).

En la mina El Silencio la roca encajante es la cuarzodiorita, del Batolito de Segovia; la mineralización consta de oro nativo, pirita, esfalerita, galena, pirrotina, calcopirita y scheellita, con ganga de cuarzo y calcita; reportan un contenido de oro de 13.27 g/t (Oquendo, 1970). Actualmente esta mina es propiedad de Gran Colombia Gold y explota una serie de filones auríferos en la zona de Segovia y Remedios, con recursos por 1.1 Moz de oro (Gran Colombia Gold, 2016).

La mina El Limón consta de un filón de 0.4 m; la roca huésped es un neis feldespático-micáceo y la mineralización está compuesta de oro nativo, galena, pirita y esfalerita en ganga de cuarzo.

El proyecto Gramalote, perteneciente a AngloGold Ashanti, se encuentra localizado en San José del Nuz (Antioquia); es un prospecto de oro mesotermal relacionado genéticamente con un plutón de la intrusión del huésped (Batolito Antioqueño). La alteración y mineralización

está estructuralmente controlada, restringida a pequeños halos a lo largo de las venas, como vetas laminadas. El contenido de sulfuros es menor al 5 %. Alguna evidencia indica que la roca huésped está directamente relacionada con los líquidos desarrollados del plutón de enfriamiento, incluyendo pegmatita, aplita y alteración de K-feldespato (AngloGold Ashanti, 2016).

Gramalote es considerado como un depósito de oro y plata controlado estructuralmente (figura 14). La mineralización está controlada por las zonas de cizalladura de tendencia norte-este/suroeste y en dirección norte-noroeste a sur-sureste por zonas extensionales que afectan las tonalitas y granodioritas del Batolito Antioqueño. La mineralización de oro se asocia con tres estadios de alteración destructora de texturas de sobreimpresión incluyendo potasio, cuarzo-sericita y carbonato de sericita. Dentro de estas zonas de alteración la mineralización anómala de oro se asocia con tres tipos específicos de *stockwork* de cuarzo; estas incluyen vetas de cuarzo con pirita de grano fino, vetas de cuarzo-carbonato y vetas de cuarzo con pirita granular (AngloGold Ashanti, 2016).

Al 31 de octubre del 2016 se realizaron un total de 145 000 m de perforaciones, con las que se obtuvieron recursos por 238.4 millones de toneladas con un tenor de 0.47 g/t para un total de 3.47 Moz de oro (AngloGold Ashanti, 2016). Actualmente este proyecto se encuentra con la licencia ambiental aprobada.

Un nuevo proyecto se encuentra localizado en el municipio de Santa Rosa de Osos (Antioquia), donde la empresa Red Eagle Mining está en etapa de construcción y montaje para extraer oro de un sistema de venas y venillas en *stocworks* dentro del Batolito Antioqueño, asociado a una zona de cizalla desarrollada en la roca encajante, con un tenor promedio de 5 g/t de oro y con reservas totales de 405 000 onzas de oro (Red Eagle Mining, 2013, 2014).

La minería de aluvión es fundamental en esta región y en ella se pueden incluir los siguientes distritos:

Nechí-Bajo Cauca. Se localiza en el norte y el noroeste del departamento de Antioquia (figura 15), en los municipios de Amalfi, Anorí, Cáceres, Caucasia, Tarazá, Valdivia y Zaragoza, e incluye depósitos en los municipios de Ayapel y Montelíbano, en el departamento de Córdoba.

Esta zona es la mayor productora de oro en Colombia, como resultado de la explotación de aluviones del Plio-Cuaternario de los ríos Cauca, Nechí y Tigüi, gravas de piedemonte y terrazas altas y bajas, además de algunas explotaciones de filón de menor cuantía.

Se compone de materiales sedimentarios del Cenozoico en la cuenca del río Nechí y río Cauca en el norte

de Antioquia, y terrenos ígneos intrusivos y metamórficos que conforman una faja paralela al río Nechí. Los placeres

más importantes se ubican cerca de la desembocadura del río Nechí al río Cauca y en los ríos Tigüi, Porce y Mata.

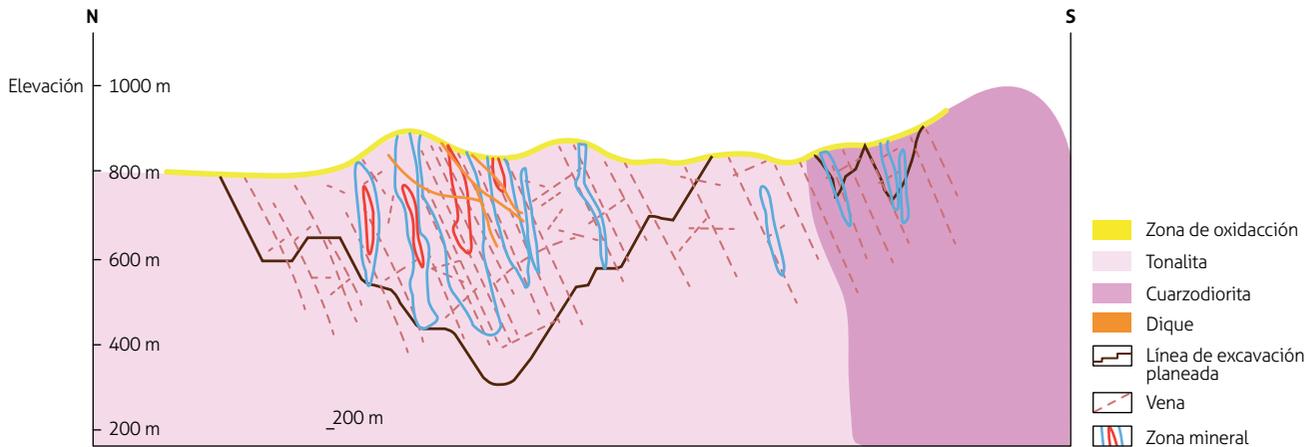


Figura 14. Modelo geológico del depósito de oro de Gramalote

Fuente: AngloGold Ashanti (2016)

En este distrito se desarrollan explotaciones a todas las escalas: minería artesanal en los municipios de Caucasia, Valdivia, Cáceres, Tarazá y Zaragoza, que se practica en los aluviones más altos; minería semimecanizada que explota áreas de piedemonte y aluviones pequeños con ayuda de motobombas y canalones; minería mecanizada en aluviones de terrazas bajas y extensas mediante buldóceres, retroexcavadoras, motobombas y draga. Las explotaciones más conocidas son Cuturú, Colonos, Barajas, Tenerife, Malvinas, Las Flores y El Bagre, que se llevan a cabo en aluviones de los ríos Cauca y Nechí.

El Bagre, la zona más importante de explotación de placeres auríferos en Colombia, se localiza en el municipio de El Bagre. Allí se explotan placeres a gran escala, mediante dragas, por el Grupo Mineros S. A., en depósitos aluviales de canales antiguos, con espesores hasta de 35 m, principalmente en los ríos Nechí y Tigüi. En el 2016 se calcularon reservas por 520 000 000 m³, con un tenor de 104 mg/m³, para un volumen aproximado de 1 600 000 onzas de oro (Grupo Mineros S. A., 2016).

En la región sur de Antioquia la mineralización está relacionada con el Batolito de Sonsón, de composición granodiorítica y edad Jurásico. Los filones se localizan dentro del macizo rocoso, en la zona de contacto y dentro de la roca metamórfica encajante.

La actividad minera en esta zona se ha concentrado en las capas superiores del terreno, en las áreas en las cuales las rocas se han degradado a arcilla por acción de los ele-

mentos y la oxidación natural, lo que facilita la extracción del oro por métodos rudimentarios.

En lo relacionado con placeres aluviales en el valle medio del río Magdalena, formado por áreas de los municipios de Sonsón, Puerto Nare, Puerto Berrío, Puerto Triunfo, San Miguel y San Luis (Antioquia); La Dorada y Samaná (Caldas); Fresno y Mariquita (Tolima), los placeres se localizan en terrazas altas y bajas de los ríos Samaná, Nare, Nus y La Miel, y en el cauce y las llanuras de inundación en proximidades al río Magdalena. En Fresno y Mariquita se encuentran en terrazas antiguas, altas y meteorizadas.

La región sur de la zona Antioquia-Sonsón-Silvia comprende municipios ubicados en la parte norte del departamento del Tolima; la mineralización se relaciona con los batolitos de El Bosque y El Hatillo, de composición principalmente granodiorítica y edad Paleógeno Inferior. Los filones presentan direcciones predominantes norte-sur y oeste-este, y se emplazan en la roca encajante, que consiste de esquistos paleozoicos del Complejo Cajamarca.

Actualmente hay explotaciones y actividad exploratoria en la región norte del departamento del Tolima, en los municipios de Santa Isabel, Falan, el Líbano y Villahermosa, en las minas El Cristo, El Cairo, Las Ánimas (antes La Plata), El Oasis, Mina Pobre y El Porvenir. El método de beneficio son la concentración gravimétrica y cianuración. La mineralización filoniana está constituida principalmente por oro nativo, cuarzo, pirita, arsenopirita, galena, esfalerita, calcopirita y cantidades menores de seleniuros y telururos (Buenaventura, 1975).

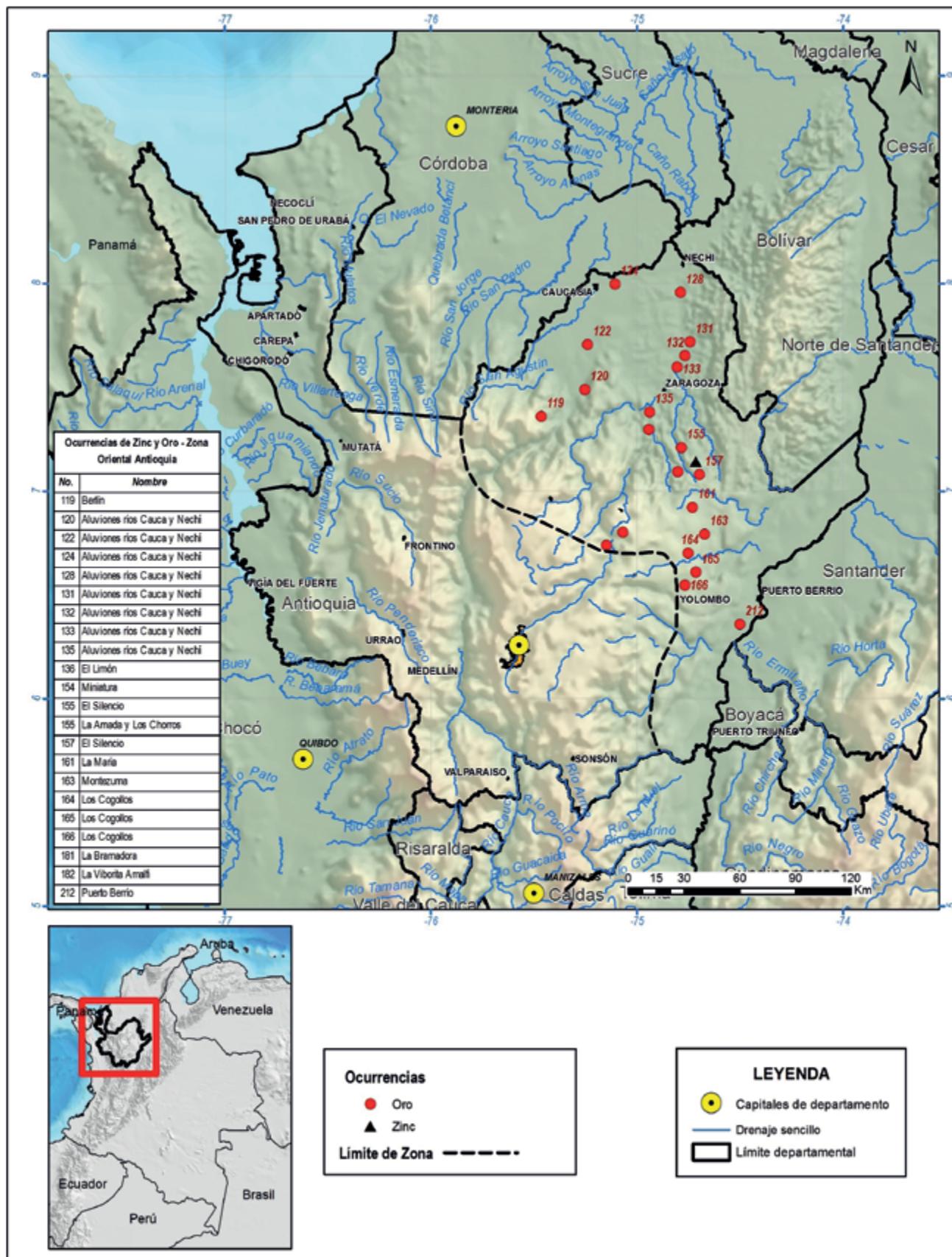


Figura 15. Localización de las mineralizaciones en la región Bajo Cauca-Nechí

Fuente: González (2001)

Zona Ibagué-Mocoa. Se extiende desde Mocoa hasta la falla de Ibagué, y está limitada al este por el sistema de falla La Plata y al oeste por la falla de Las Delicias. En esta zona se presentan depósitos y prospectos de minerales metálicos y no metálicos, pero predominan estos últimos. La característica principal del sector es la ausencia de filones auríferos, con excepción de algunas venas y venillas en forma de estoverca que se encuentran en el sector de San Luis, de edad Paleozoico-Jurásico; algunas concentraciones de oro están presentes en *skarn* (Salinas, Lozano y Solano, 1999). Los principales depósitos en esta zona corresponden al *skarn* de Mina Vieja, situada en la Cordillera Central, y a los placeres auríferos del río Saldaña.

El yacimiento de Mina Vieja está ubicado en el municipio de San Luis, corregimiento de Payandé (Tolima); los sulfuros presentes son calcopirita, piritita dispersa, galena, esfalerita y molibdenita, pero también hay magnetita y silicatos de calcio (granates andradita y grosularia, diópsido, epidota, wollastonita) y calcita; el metal principal es el cobre, pero tiene importantes contenidos de oro y plata; en concentrados de batea se detecta la presencia de minerales de tungsteno, sobre todo scheellita (Vergara, 1986). Los depósitos de *skarn* conocidos se asocian con la zona de contacto, entre calizas de edad Triásico y *stocks* granodioríticos de edad Jurásico.

Los placeres auríferos del río Saldaña se ubican en el sur del departamento del Tolima, en aluviones del río Saldaña, afluente del Magdalena, en los municipios de Ataco, Chaparral y Coyaima. Los aluviones tienen entre 5 y 20 m de profundidad; el metal se concentra en la parte inferior, encima de la roca basal, en una cinta que tiene 0.7 m de espesor promedio.

La explotación es a baja escala y se realiza por métodos manuales, con ayuda de canaletas y algunas veces con motobombas de baja capacidad; desde hace ya varios años por el Grupo Mineros S. A. está a la espera de la aprobación de licencia ambiental para la operación a mediana escala en estos aluviones.

3.2.3. Bloque Norandino, zona de transición

Se encuentra ubicada entre las cordilleras Central y Occidental, siguiendo en gran parte el cauce del río Cauca dentro del sistema andino.

Zona Cauca-Romeral. Geológicamente está limitada por los sistemas de fallas Cauca y Romeral. Representa una mezcla estructural de rocas originadas en ambiente continental y ambiente oceánico, afectada por tres eventos magmáticos (Cretáceo, Paleógeno y Neógeno), con los cuales

se asocian la mayor parte de las mineralizaciones. La época metalogénica más importante fue la del Neógeno, con la formación de la mayor parte de las mineralizaciones de oro vetiforme (Salinas, Lozano y Solano, 1999), con mineralizaciones asociadas a depósitos epitermales de intermedia y baja sulfuración, pórfidos y orogénicos.

En esta provincia se localizan los distritos mineros de Marmato, Ginebra-Bolívar, San Pablo, Ancuyá, El Tambo-El Bordo, Fredonia-Titiribí y Mistrató.

Distrito minero de Titiribí. González (2001) incluye el distrito de Titiribí dentro de la zona minera del Cauca, que está conformado por los municipios aledaños al río Cauca desde Valparaíso y Santa Bárbara al sur, hasta Sabanalarga y Peque al norte, donde las características geológicas son similares y están relacionadas con un intenso tectonismo del sistema de fallas Romeral, que genera cuencas de tracción, en las cuales se depositaron sedimentos molásicos continentales.

El yacimiento de El Zancudo es una veta con buzamiento de 75° con respaldos de esquistos cloríticos; se presenta entre conglomerados en el techo y esquistos en el suelo; su buzamiento cambia a solo 12°. La mena primaria contenía arsenopirita, jamesonita, estibina, calcopirita, piritita, galena y blenda, que constituían una mena compleja difícil de cianurar y que requería un tratamiento metalúrgico especial para poderle extraer sus valores de oro y plata (Garcés, 1995).

El Proyecto Buriticá es uno de los tres grandes proyectos actuales en minería de oro del país, localizado en el municipio de Buriticá en el departamento de Antioquia; pertenece a la empresa Continental Gold, y es un depósito epitermal de intermedia sulfuración emplazado en rocas andesíticas y brechas, cuya mineralización es controlada por un sistema de fallas. Hay dos zonas de interés: Yaragua y Vetas Sur, con venilleos en un intervalo de 150 m, las cuales tienen unas reservas de 3.7 Moz de oro y 10.7 Moz de plata (13.7 millones de toneladas con tenor de 8.4 g/t de oro y 24.3 g/t de plata) (Continental Gold, 2016).

El proyecto Quebradona, perteneciente a las empresas Anglo Gold y B2Gold, se encuentra localizado en el municipio de Jericó (Antioquia). El área principal del proyecto se llama Nuevo Chaquiro, el cual es un depósito típico de pórfido de cobre con bajo grado de oro, molibdeno y plata. El patrón estructural en la zona facilitó el ascenso de los cuerpos intrusivos a través de la secuencia volcánoclastica de la Formación Combia. Los intrusivos no alcanzan la superficie y permanecen como un depósito ciego a pesar de la erosión, actuando durante un periodo significativo (AngloGold Ashanti, 2016).

El depósito de Nuevo Chaquiro es una diorita en edad Mioceno con diques de cuarzdiorita y *stock* verticales que intruyen una gruesa sección de tobas andesíticas y rocas volcánicas de la Formación Combia del Mioceno (6-10 Ma), que llena un gran cuenca de *pull-apart* del cinturón medio del Cauca. La profundidad de la mineralización de la superficie es alrededor de 150-400 m de NE a SW; la zonación típica de alteración del pórfido de cobre es evidente con una zona central de alta temperatura; K-silicato (biotita, magnetita, calcopirita y molibdenita) que se convierte en una zona de alteración sericítica superpuesta

(moscovita, clorita, cuarzo, pirita, + - turmalina) rodeada por una alteración propilítica más distal (clorita, epidota, illita, carbonato), y también hay un núcleo de alteración cálcico-potásica con biotita, actinolita, epidota y anhidrita con valores menores de cobre, oro y molibdeno (AngloGold Ashanti, 2016).

Con base en los resultados de exploración del proyecto Nuevo Chaquiro se estimaron valores de 5.6 Moz de oro, 7933 millones de lb de cobre, 78 Moz de plata y 162 millones de lb de molibdeno, siendo así uno de los principales proyectos para cobre, plata y molibdeno en el país.

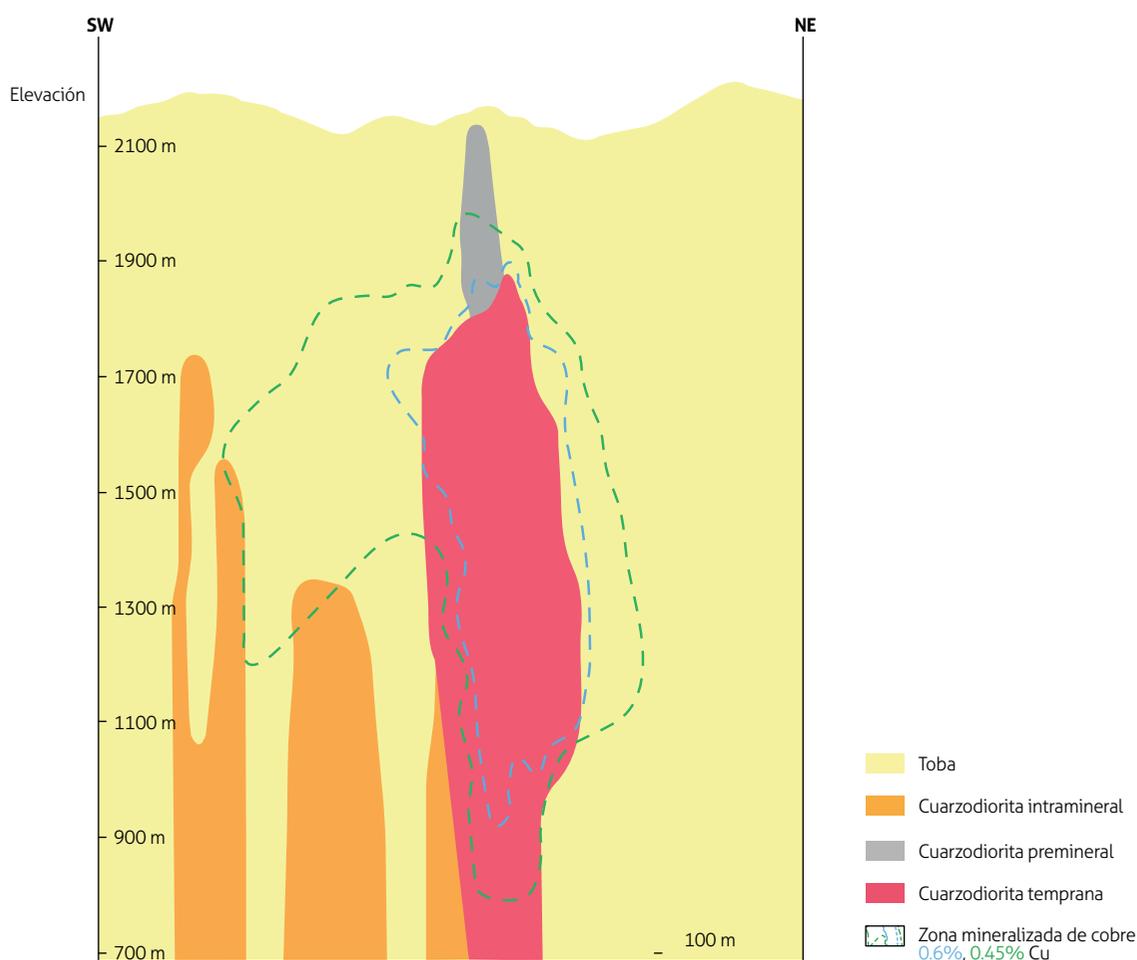


Figura 16. Modelo geológico del pórfido cuprífero de Nuevo Chaquiro

Fuente: AngloGold Ashanti (2016)

Distrato de Marmato. Hay concentraciones de oro de filón en los municipios de Marmato, Supía, Manizales, Pensilvania y Villa María, en el departamento de Caldas, donde la mineralización está asociada con intrusivos porfiríticos de composición intermedia y edad Paleógeno. La principal

actividad minera se lleva a cabo en las minas de Marmato y Echandía, situadas al noreste de la cabecera municipal de Marmato.

Las minas de Marmato se encuentran en el municipio del mismo nombre en el departamento de Caldas. En este

distrito la mineralización se concentra en filones epitermales de oro y plata, asociados con rocas hipoabisales de composición félsica a intermedia, que se hospedan dentro del pórfido y en ocasiones invaden la roca metamórfica encajante del denominado Complejo Ofiolítico del Cauca.

Se diferencian tres sistemas principales de filones, con sus ramificaciones, identificadas como grupos: norte, conformado por dos vetas de dirección N70°W; grupo central, integrado por tres vetas de rumbo N85°W, y sistema sur, con tres filones de dirección N55°W, todas con buzamiento de 70-90°SE y espesores que varían entre 1 y 2.5 m.

La mineralización es relativamente simple, con pirita (95 %) acompañada de marmatita (1-2 %) y galena (< 1 %), con algo de calcopirita y arsenopirita, en ganga de calcita y cuarzo, y con pirrotina ocasional; el mineral marmatita derivó su nombre de este lugar. La mayor parte del oro se encuentra en estado libre.

El tenor varía dentro de un amplio rango, entre 5 y 40 g/t de oro. En esta región la mineralización hidrotermal presenta condiciones epitermales en la parte alta, con presencia de cantidades importantes de plata nativa y sulfosales de plata, pasando a condiciones algo mesotermiales en las zonas baja y media y de Marmato.

Entre las explotaciones más importantes se mencionan las que se realizan en la parte baja por parte de la empresa Gran Colombia Gold con recursos totales estimados en 14 Moz de oro y 90 Moz de plata (Gran Colombia Gold, 2016), y la explotación a menor escala en la parte alta, por cuenta de la comunidad minera de Marmato. Las reservas medidas fueron de alrededor de 780 kg y las inferidas de 6500 kg (Castro y Lozano, 1995).

El *distrito minero de Quinchía* comprende áreas aledañas a los municipios de Anserma, Quinchía y Guática; en esta región afloran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, con edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. En 1971 solo se localizó la mina El Chaquiro en el Mapa de Ocurrencias Minerales del departamento de Risaralda (Guarín, 1971).

Minercol e Ingeominas efectuaron trabajos de evaluación geológico minera del yacimiento aurífero de Miraflores, distrito aurífero de Quinchía (Risaralda), cuyos resultados se muestran en un informe del 2000 elaborado por Gabriel Rodríguez *et al.* De este informe se extrae lo siguiente:

- El área de las minas de Miraflores está ubicada aproximadamente a 6.9 km del casco urbano del municipio de Quinchía, en el extremo nororiental del departamento de Risaralda.

- En el área de estudio afloran las siguientes rocas: vulcanitas básicas de afinidad oceánica, conformadas por basaltos, diabasas y microgabros pertenecientes a la Formación Barroso; sedimentitas clásticas, compuestas por arenitas, arenitas conglomeráticas y lodolitas del Miembro Superior de la Formación Amagá; rocas volcánicas fragmentales, constituidas por tobas de cristales y líticas asociadas a la Formación Combia; rocas hipoabisales, constituidas por pórfidos andesíticos y dacíticos del pórfido andesítico de Irra, y un cuerpo intrusivo subvolcánico con estructura brechoide, constituido principalmente por fragmentos líticos de basaltos y diabasas y, en menor proporción, por fragmentos líticos de pórfidos andesíticos-dacíticos, gabros, granitos, sedimentitas clásticas y tobas. Los fragmentos están embebidos en una matriz de fragmentos de roca, cementados por epidota, calcita y cuarzo. Este cuerpo se denominó brecha lítica de Miraflores (Rodríguez *et al.*, 2000).
- En esta área se presentan mineralizaciones auro-argentíferas en forma de venas y diseminada. Los minerales principales de las venas son cuarzo y calcita; como accesorios pirita, calcopirita, esfalerita, galena, oro, melnicovita, granate y epidota, y como minerales de alteración calcantita, malaquita, eponita, limonita, yeso y minerales del grupo de las arcillas. La mineralización diseminada muestra contenidos medios de oro del orden de 0.7 g/t y localmente valores mayores de 1.0 g/t.
- La alteración hidrotermal asociada a la brecha de Miraflores es propilítica de alta temperatura, y la mineralización en venas y diseminada es epitermal baja en azufre. Los recursos de oro diseminados en la brecha de Miraflores son del orden de 22 690 472 g de oro (Rodríguez *et al.*, 2000).
- El Chaquiro, distrito ubicado en el municipio de Quinchía (Risaralda), es de tipo filoniano y su mineral más abundante es el cuarzo; minerales comunes son pirita y óxidos; minerales accesorios arsenopirita, otros sulfuros y carbonatos (Ingeominas, 2001).

El proyecto La Colosa, propiedad de la multinacional AngloGold Ashanti, se encuentra localizado en cercanías de Cajamarca (Tolima), en un complejo de pórfido de oro de composición diorítica de fase tardía (8.1 Ma) intruido en rocas meta-sedimentarias paleozoicas. Aunque el sistema de pórfido es generalmente pobre en cobre, una anomalía de Cu 0.1-0.2 % asociada con Mo > 150 ppm ocurre lateralmente y en profundidad (figura 17). La mineraliza-

ción de oro de grado más alto está estrechamente asociada con una serie de pórfidos tempranos, intrusiones/brechas con alteración potásica y sódica-cálcica, alta intensidad de vetas de sulfuro de oro y valores de azufre en general superiores al 2.5 %. El pórfido diorítico puede dividirse en tres fases (inicial, intermineral y tardía) y es de forma elíptica,

con un eje máximo norte-sur conocido de al menos 1200 m. El pórfido tiene una dirección N10W con una inclinación de 75°NE-E, los contactos están estructuralmente vinculados. Los diques interminerales y tardíos se extienden tanto hacia el norte como hacia el sur en los esquistos foliados (AngloGold Ashanti, 2016).

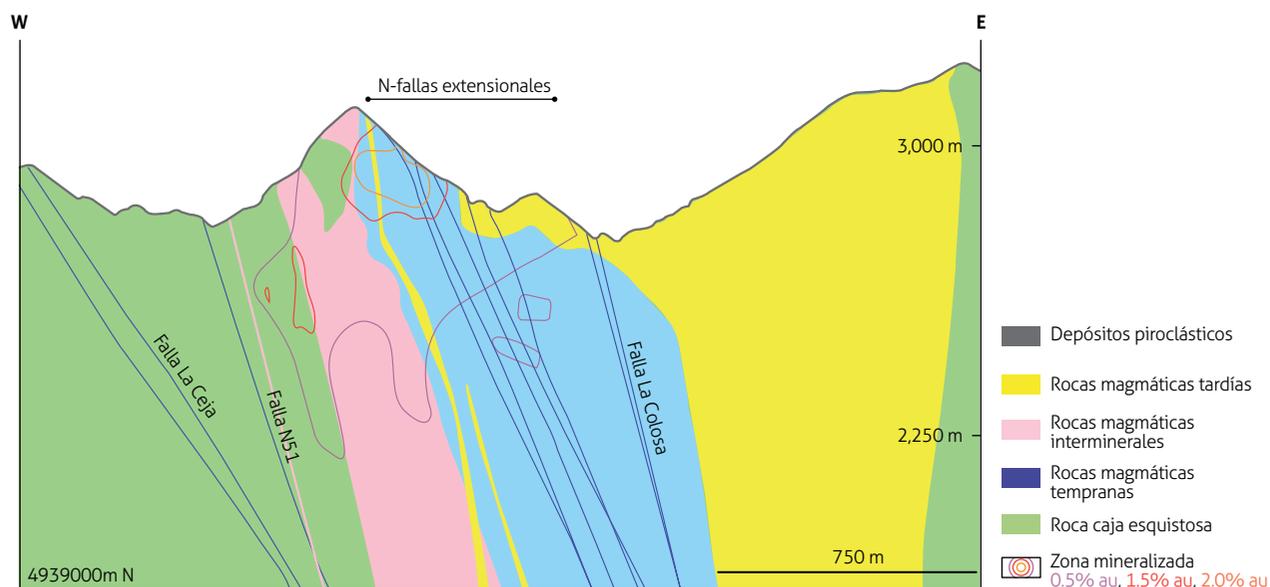


Figura 17. Geología del depósito de pórfido de oro de La Colosa

Fuente: AngloGold Ashanti (2016)

En el proyecto La Colosa se han perforado 138 969 m para la estimación de recursos indicados, los cuales están en el orden de 22.4 Moz de oro (AngloGold Ashanti, 2016), convirtiéndolo en el mayor depósito de oro descubierto a la fecha en Colombia.

El distrito minero de la zona de Almaguer fue muy importante en los siglos XVIII y XIX. Hoy en día se opera en pequeña escala en los municipios de Almaguer, Bolívar, La Vega y La Sierra, en el departamento del Cauca, y San Pablo, Buesaco y La Unión en el departamento de Nariño.

3.2.4. Bloque Norandino, dominio oceánico

Abarca las regiones geográficas de la Cordillera Occidental, la serranía del Baudó y la zona de la costa Pacífica. Geológicamente se ubica en un basamento cretáceo de origen oceánico que se encuentra limitado al este por el sistema de fallas del río Cauca y al oeste por el océano Pacífico. Durante el Cretáceo un ambiente marino de fondo oceánico, rico en manganeso y cobre, permitió la formación de concentraciones locales importantes de estos minerales; sobre este ambiente oceánico ocurrieron dos épocas

de mineralización: en el Paleógeno, cinturones cupríferos (Cu, Cu-Au) se alojaron a lo largo de la subprovincia Mandé-Farallones; en el Neógeno, pequeños cuerpos intrusivos dioríticos ampliamente espaciados son los portadores de las mineralizaciones hidrotermales de oro y cobre vetiformes (Salinas, Lozano y Solano, 1999). Esta región está dividida en las zonas Mandé-Farallones y Anchicayá-Piedrancha.

La zona Mandé-Farallones comprende un amplio sector de la Cordillera Occidental, en los departamentos de Antioquia, Risaralda y Chocó. Los filones auríferos se relacionan con rocas plutónicas, entre ellas Morro Pelao, páramo de Frontino, Cerro Plateado, Farallones del Citará y el Batolito de Mandé; a este se le han asociado varias de las minas situadas en los municipios de Murindó, Urrao, Dabeiba, Salgar, Bolívar, Betania y Andes en Antioquia; Quibdó, El Carmen y Bagadó en el Chocó, y al noroccidente del municipio de Mistrató en Risaralda.

Las mineralizaciones de El Roble y quebrada La Equis son las más importantes que se presentan en esta zona. La mineralización de la mina El Roble, perteneciente a la

empresa Atico Mining Corporation, localizada sobre la Cordillera Occidental, en el departamento del Chocó, es el único depósito de sulfuros masivos en explotación. La mineralización se encuentra asociada a basaltos oceánicos cuyo producto principal de explotaciones es el cobre y el oro como subproducto. Entre el 2012 y el 2015 Atico Mining Corporation realizó un programa de exploración y obtuvo recursos medidos de 1.8 millones de toneladas de mineral, con un contenido de 3.46 % Cu y 2.27 % Au (Atico Mining Corporation, 2016).

La mineralización de la quebrada La Equis, la más conocida de la Cordillera Occidental, se encuentra en el municipio de Quibdó, cerca de la población de Tutunendo. En el área aflora la Formación La Equis, conformada por una secuencia de rocas piroclásticas, aglomerados y tobas, de color verde oscuro a negro. Los aglomerados son las rocas más abundantes y están compuestos por cantos angulares a subangulares, del orden del centímetro al metro, en mayor proporción de rocas andesíticas. La matriz es vítrea y en algunos casos tobácea, de composición similar a la de los cantos, con amígdalas rellenas de zeolitas, calcita, calcedonia y epidota. Los aglomerados se encuentran en paquetes pseudoestratificados con espesor hasta de 10 m. Las tobas son cristalinas y vítreas, de colores gris, verde, rojo y violáceo, y están compuestas por fragmentos de cuarzo, feldespatos caolinizados, vidrio en proporción variable y rocas volcánicas. Se presentan en capas de espesor entre centímetros y varios metros.

Localmente, en las tobas, se observan areniscas calcáreas fosilíferas interestratificadas. Los niveles de tobas están parcial a totalmente meteorizados, dando lugar a suelos de color granate, rojo y violáceo (Ingeominas-Geominera, 2003). En la mineralización de la quebrada La Equis se trabaja un filón con 2 m que contiene oro (12 g/t), plata (19 g/t), esfalerita, galena y calcopirita (Lozano y Pulido, 1987).

Un prospecto importante en la zona Mandé-Farallones es el de Murindó, localizado en la región norte del Batolito de Mandé. El área del prospecto comprende parte de las planchas 113, 114, 128 y 129, a escala 1:100 000, y de las planchas 113-II-A, 113-II-B, 113-II-C, 113-II-D, 113-IV-A, 113-IV-B, 113-IV-C, 113-IV-D, 114-I-A, 114-I-C, 114-III-A, 114-III-C, 128-II-A, 128-II-B y 129-I-A, a escala 1:25 000.

El prospecto consiste en una mineralización diseminada de cobre con valores significativos de oro. Las rocas porfiríticas de composición dacítica, con las cuales está relacionada la mineralización, aparecen como facies marginales o se encuentran intruyendo el Batolito de Mandé. Asociada a estas rocas se observa una intensa alteración

hidrotermal; los sulfuros están representados por pirita, calcopirita, escasa bornita y molibdenita (Guarín y Álvarez, citados en Ingeominas-Geominera, 2003).

El rasgo tectónico principal en el territorio Murindó-Pantanos está representado por la falla de Murindó, de ángulo alto, con dirección N10°W y demás fallas relacionadas, ubicadas en el flanco oeste de la Cordillera Occidental.

El grado de meteorización que se presenta en la zona impide hasta cierto punto una evaluación clara de los procesos hidrotermales, así como de la extensión de la mineralización. En la zona de Murindó se ha reconocido alteración de tipo potásico, alteración sericitica (fílica) y alteración propilitica; la alteración argílica es prácticamente ausente y, solo en algunos casos, es incipiente.

En esta área se han efectuado estudios geoquímicos regionales y detallados; los primeros sirvieron para definir áreas o zonas anómalas sobre las cuales se desarrollaron posteriormente trabajos detallados, que culminaron con el descubrimiento de prospectos como Pantanos-Pegadorcito y Murindó.

El proceso y la interpretación de los resultados de los trabajos geoquímicos realizados permitieron el establecimiento de un modelo metalogénico conceptual para el territorio Murindó-Pantanos, a partir de un modelo de intrusión central, modificado para las características propias de esta área. En él se definen como potenciales los yacimientos porfídicos tipo Cu- (Mo, Au) de depósitos de *skarn* de Cu-Au, alternativamente de Mo, W y Au. El producto final del trabajo se resume en la selección de un total de cinco áreas potenciales, con sus respectivos niveles de prioridad, atendiendo al grado de certidumbre con que se cuenta en la actualidad, a partir del volumen de datos que aportan argumentos para su definición (Ingeominas-Geominera, 2003).

Placeres auroplatiníferos y auríferos provenientes de complejos tipo Alaska y de rocas básicas a intermedias se encuentran en las cuencas de los ríos Atrato, San Juan, Condoto, Iró y Sucio (Salinas, Lozano y Solano, 1999).

En los placeres auríferos, en los ríos Atrato y San Juan, la minería es principalmente de oro y platino, y se hace en aluviones de las corrientes que drenan el flanco occidental de la Cordillera Occidental, en el departamento del Chocó, tales como el río San Juan y sus afluentes los ríos Iró, Condoto, Opogodó, Sipí, Cajón y Tamaná; el río Atrato y sus afluentes los ríos Andágueda, Quito, Bebará, Neguá, Bebaramá, Murri, Arquía y Sucio, además de los ríos Nindó y Chaquenodá, afluentes del río Murri y el río Amparradó, afluente del Ríosucio.

Los depósitos que contienen los placeres son aluviones recientes de lecho de corrientes, depósitos de llanura

de inundación del holoceno y terrazas del Pleistoceno. Los aluviones y llanuras de inundación son gravas arenosas sueltas, mal seleccionadas, de 1 a más de 15 m de profundidad, compuestos por fragmentos de diorita, andesita, basaltos, gabros, pórfidos andesíticos, *chert*, cuarzo y, esporádicamente, piroxenitas; las terrazas que conforman mesetas son un poco más compactas (Rosas y Monroy, 1978).

En estos yacimientos los metales preciosos se encuentran en estado libre, con un contenido que oscila alrededor del 55 % de oro y del 45 % de platino (UPME, 2005). En general, los tenores más altos se localizan en la parte inferior del depósito, cerca del contacto con el basamento rocoso.

En la zona Anchicayá-Piedrancha, situada en los departamentos de Valle del Cauca, Cauca y Nariño, se encuentra también un basamento oceánico, pero con presencia de metamorfismo regional y ofiolitas (Salinas, Lozano y Solano, 1999).

Las mineralizaciones existentes son las siguientes:

- En el departamento de Nariño, importantes mineralizaciones filonianas están asociadas con un conjunto de rocas plutónicas, entre ellas Cumbitara, Piedrancha, Nambí y El Vergel, que intruyen rocas volcánicas básicas, rocas sedimentarias y vulcano/sedimentarias de edad Cretácico.
- La actividad minera se distribuye en los municipios de Los Andes, Santa Cruz, Cumbitara, Samaniego y Mallama. En Santa Cruz la mineralización consta de filones de cuarzo en zona de fractura con dirección noreste, con oro (7 g/t), plata (110 g/t), pirita, arsenopirita, calcopirita y esfalerita (Lozano y Pulido, 1987).

Otras zonas auríferas fueron importantes productoras de oro, pero actualmente los yacimientos en muchas de ellas se han agotado y en otras la producción es baja. Sin embargo, algunas de estas zonas pueden ser aún fuentes potenciales significativas, que requieren prospección y tecnificación en los métodos de explotación y beneficio.

En esta zona los depósitos de placeres aluviales de oro son muy abundantes, especialmente en el borde occidental de la cordillera; los principales son:

Patía-Naya-Dagua. extensa región de la llanura del Pacífico, en los departamentos de Nariño, Cauca y Valle, donde se presentan placeres en depósitos aluviales de los ríos Telembí, Patía, Mangüí, Ispí, Timbiquí, Guapi, Coteje, Naspí, Iscuandé, Tapaje, Micay, Naya y Dagua.

Barbacoas. Se reconoce como la zona más importante en minería aluvial del suroccidente del país, en el departamento de Nariño; es una amplia región ubicada en los municipios de Barbacoas, San José y Payán. En esta zona se conocen tres tipos de materiales auríferos: 1) aluviones de terrazas altas compactas, de pequeña extensión; 2) aluviones de piedemonte moderadamente compactos y de extensión mayor que la anterior, y 3) aluviones más recientes, más bien sueltos, depositados en antiguos canales de los ríos Telembí y Patía, y los afluentes Mangüí, Ispí y Naspí, el Guelmandí e Iscuandé (Lozano y Pulido, 1987).

Naya. Aluviones recientes del río Naya, en límites entre Cauca y Valle del Cauca. No existen datos sobre producción, pero se conoce la existencia de explotaciones auríferas con métodos manuales a nivel de subsistencia.

Otros municipios con alguna actividad aurífera son Magüí e Iscuandé (Nariño); Guapi, Timbiquí y López (Cauca), y Buenaventura y Dagua (Valle del Cauca). En toda esta región se practica minería artesanal.

3.3. Situación actual de la minería

A continuación se hace un recuento del estado actual de la minería de oro en el país.

3.3.1. Potencial

Colombia tiene un alto recurso potencial de oro, pero la cantidad total es desconocida, salvo algunos estudios de evaluación y estimación de recursos de oro de minas realizados hace varios años por Ingeominas, Naciones Unidas, algunas entidades extranjeras, empresas nacionales y multinacionales. Cabe anotar que en los últimos quince años ha crecido en gran medida la inversión en exploración por parte de empresas multinacionales, las cuales han hecho descubrimientos con recursos medidos de 22.3 Moz para el proyecto La Colosa; 16 Moz para proyectos localizados en California-Vetas; 2.5 Moz para Gramalote, y 2.1 Moz para el proyecto Quebradona. Gran Colombia Gold en sus dos proyectos bandera, localizados en Segovia (Antioquia) y Marmato (Caldas), posee 12.5 Moz; 1 Moz para Red Eagle Mining en Santa Rosa (Antioquia); 0.2 Moz en el proyecto mina El Roble de Atico Mining Corporation, entre otros.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2011 realizó el *Mapa de Zonas con Potencial Integral de Colombia para Recursos Minerales* con el fin de determinar, calificar y clasificar zonas potenciales integrales para recursos minerales, de todos los grupos, clasificándolas en zonas con potencial alto, medio y bajo (figura 18).

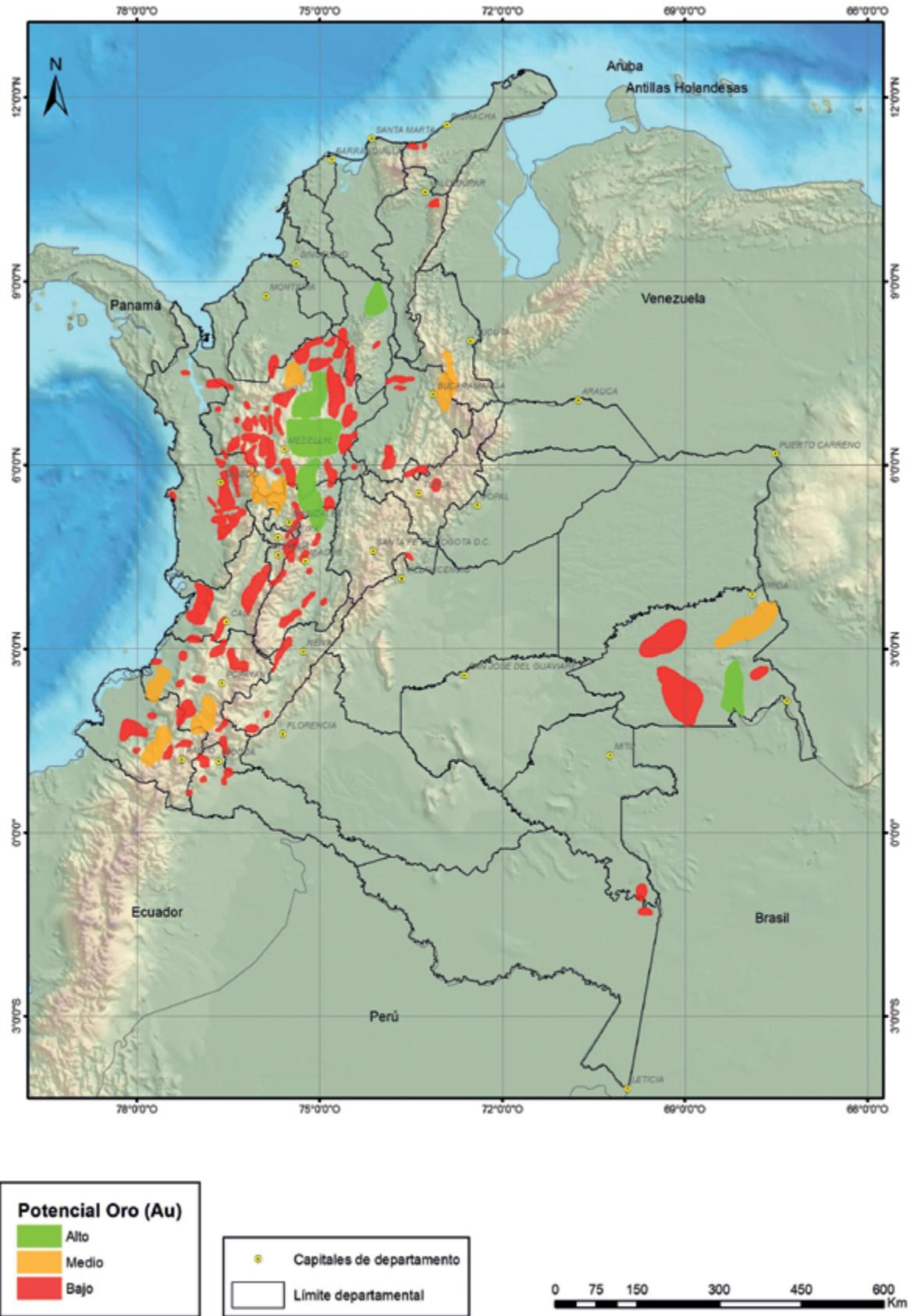


Figura 18. Mapa con zonas potenciales para oro

Fuente: SGC, 2011

La política minera ha experimentado condiciones favorables a raíz de la aprobación del documento “Estrategias para el fortalecimiento del sector minero en Colombia”, por parte del Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes 2898, 1997), cuyo propósito fue propiciar cambios para mejorar el sector. Como fruto de esta decisión se expidió un nuevo Código de Minas, mediante la Ley 685 del 2001, en el cual se plasmaron las directrices básicas que rigen las relaciones del Estado con el inversionista minero (UPME, 2005).

El aumento de los precios internacionales y la creciente demanda de oro, junto con la revaluación del dólar, favorecen los proyectos que están en operación; sin embargo, en los últimos años se viene presentando una desaceleración en las actividades exploratorias a nivel mundial, ya que las empresas están reestructurándose y, adicionalmente, las políticas medioambientales y los procesos de consulta popular en contra de actividades mineras están poniendo en retroceso el dinamismo minero en el país.

3.3.2. Comercio

La fuente principal de producción de oro en Colombia es la minería de aluvión, con una participación del 80 %, aproximadamente. La producción de oro en Colombia en los últimos veinte años está en continuo crecimiento; actualmente triplica la producción de aquel periodo, esto a causa del déficit de la producción mundial, con la consecuente mejora de los precios, que estimula el incremento de la producción, añadiendo a esto la tecnificación de varias minas en el país.

Los datos reportados expresan que la producción de oro es muy variable, con altibajos en los últimos veinte años, aunque con tendencia general en ascenso continuo (figura 19): los periodos 1994-1997, 2001-2002 y 2006-2007 fueron los más bajos, con producciones del orden de 20, 24 y 15 t, respectivamente; este último periodo coincidente con la crisis económica mundial de las materias primas. En el 2012 se presenta la cifra récord histórica de producción con 66.1 t y en el 2016 se situó en 61.8 t de oro, con tendencia ascendente.

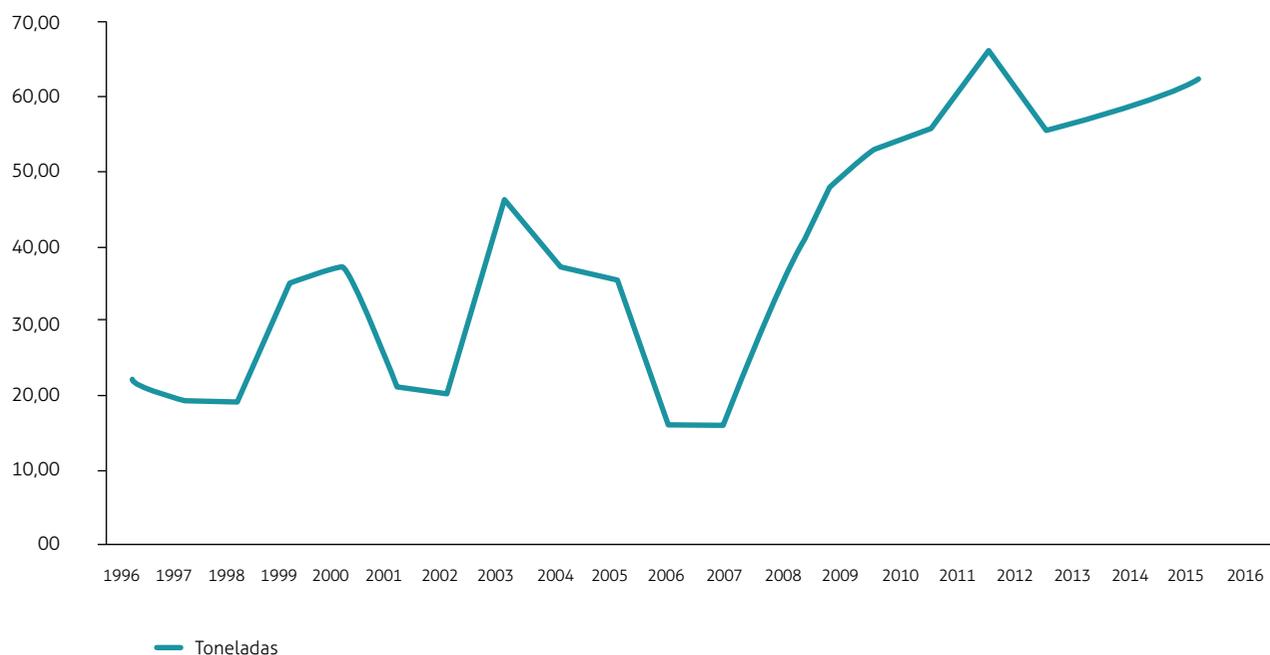


Figura 19. Variación de la producción de oro de mina en Colombia Periodo 1996-2016, (toneladas)

Fuente: UPME (2016)

En la tabla 5 se muestra la producción de oro en Colombia por departamentos, entre los años 1996 y 2016. Estas cifras corresponden a los datos de compra reportados

por las casas fundidoras y son únicamente aproximaciones de la producción real nacional, ya que la explotación informal dificulta un registro exacto.

Tabla 5. Producción de oro en Colombia por departamentos, 1996-2016

Departamento	1996	2001	2006	2011	2016
Antioquia	9218.33	10 021.99	10 724.24	19 156.33	25 363.16
Bolívar	7745.21	2178.90	991.13	5423.03	4084.01
Caldas	708.14	644.92	1416.57	1273.08	2458.19
Cauca	407.82	450.6	281.4	1127.57	3742.81
Chocó	457.01	854.67	1192.29	27 915.13	14 527.32
Córdoba	2804.80	6741.66	462.02	69.18	488.93
Guainía	78.08	2.55	11.33	29.71	441.48
Nariño	123.19	253.22	122.06	235.77	9257.91
Risaralda	57.57	60.87	29.95	35.99	294.44
Santander	104.96	23	139.61	60.36	82.68
Tolima	65.53	31.95	241.47	268.9	483.61
Valle del Cauca	255.14	349.59	62.55	200.57	413.65
Otros	46.93	198.64	8.2	112.22	167.11
Total	22 119.64	22011.2	15 691.02	56 020.06	61 972.41

Kilogramos

Fuente: UPME (2016)

Los datos de producción a nivel departamental muestran que Antioquia, Chocó y Nariño, produjeron el 79 % del oro en Colombia en el 2016, lo cual puede estar relacionado con la minería aluvial de oro, ya que en estos tres departamentos se encuentran las zonas más productoras de este tipo de depósitos en el país.

En la tabla 6 se relacionan los valores de producción de oro en el 2017, en el territorio colombiano, manteniendo los departamentos de Antioquia y Chocó la producción más alta.

Tabla 6. Producción de oro en Colombia durante el 2017

Departamento	Producción de oro
Antioquia	631 613.57
Bolívar	134 938.23
Caldas	74 174.10
Caquetá	1.11
Cauca	71 566.18
Chocó	261 646.27
Córdoba	20 474.86
Huila	4453.65
Nariño	85 332.30
Putumayo	1187.73
Risaralda	6515.41
Santander	2494.49
Tolima	25 165.40
Valle del Cauca	832.43
Total	1 320 395.73

Datos en onzas Troy

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

Las exportaciones registradas de oro se efectúan en tres presentaciones principales: en bruto, semilabrado o en polvo (no aparecen exportaciones de concentrados de minerales). Los principales países de destino fueron Estados Unidos, Suiza e Italia; el oro en bruto incluye el oro platinado y las demás formas en bruto, para uso no monetario.

En la figura 20 se observa la relación de las exportaciones de oro; en los últimos seis años el comportamiento ha sido a la baja, con una leve recuperación para el 2016, y se espera que se sigan incrementando las exportaciones de este metal.

**Figura 20.** Valor de las exportaciones de oro en Colombia

Fuente: UPME (2016)

De acuerdo con los datos de los últimos cinco años, Colombia exporta sobre todo la materia prima, lo que no permite obtener un valor agregado significativo debido al bajo comercio de material elaborado.

Sin embargo, hay buenas perspectivas de producción de oro de mina con la ampliación de operaciones mineras como la de Continental Gold en Buriticá; las de Gran Colombia Gold en Segovia y Marmato; la puesta en operación de la mina San Ramón, propiedad de Red Eagle Mining, y el proyecto Gramalote en San José del Nuz. Todos estos incrementos apalancarán más al país en la producción de oro, haciéndolo nuevamente interesante para la inversión extranjera; asimismo se espera un apoyo más dinámico por parte del Gobierno nacional en el tema minero en cuanto a la fiscalización, formalización y seguridad jurídica para afianzar el desarrollo del sector.

El factor que más ha incidido en el crecimiento en la producción de oro se atribuye al incremento de sus precios en los mercados mundiales, coyuntura que ha incidido en el interés de empresas extranjeras para hacer inversión. En el marco de esta tendencia se inscribe también la dinámica que ha adquirido en los últimos años la contratación de áreas para explorar y explotar, principalmente oro (UPME, 2005).

4. Aspectos ambientales y sustitutos

El ^{138}Au radiactivo se utiliza en radiaciones medicinales, en diagnóstico y en algunas aplicaciones industriales como trazador. También se usa como trazador en el estudio del movimiento de sedimentos sobre el fondo oceánico y en los alrededores de los puertos. Las propiedades del oro hacia la energía radiante han permitido el desarrollo de reflectores eficientes para calentadores infrarrojos y hornos, así como para retención y enfoque de calor en procesos industriales.

No obstante, algunos efectos de la sobreexposición son: por inhalación: puede provocar irritación si la exposición es prolongada o excesiva; por ingestión: no se esperan efectos adversos; por contacto en la piel: puede provocar irritación y reacción alérgica; por contacto en los ojos: puede provocar irritación.

La ecotoxicidad del oro no ha sido evaluada; sin embargo, se espera que la degradación del oro bajo condiciones aerobias sea muy pobre y no hay evidencia que sugiera que pueda crear problemas ecológicos al ser vertido en el medio. Ya que el oro es insoluble, se cree que tiene características mínimas de bioacumulación y biodisponibilidad.

Referencias

- Actualitix.com. (2015). *América - Oro - Países Exportadores* (\$). Disponible en <https://es.actualitix.com/pais/amer/america-oro-exportacion.php>
- Agencia Nacional de Minería. (2018). *Así se movieron las cifras de producción de minerales en 2017*. Disponible en <https://www.anm.gov.co/?q=asi-se-movieron-las-cifras-de-produccion-de-minerales-en-2017>
- AngloGold Ashanti. (2016). *Anglogoldashanti.com. Mineral resource and ore reserve report 2016*. Disponible en https://thevault.exchange/?get_group_doc=143/1502779473-2016MineralResourceandOreReserveReport.pdf
- Ash, C. y Alldrick, D. (1996). Au- Quartz Veins. En D. Lefebure y T. Hoy (Eds.), *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles. Metallic Deposits Profiles*, vol. 2. Columbia: Ministry of Employment and Investment.
- Atico Mining Corporation. (2016). *El Roble Mine*. Disponible en <http://aticomining.com/el-roble-mine/snapshot/>
- Bateman, A. (1957). *Yacimientos minerales de rendimiento económico*. Barcelona: Omega.
- British Columbia Geological Survey (BCGS). (2002). *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*. Victoria.
- Berger, B. (1992a). Descriptive model of Carbonate-Hosted Au-Ag. En D. Cox y D. Singer (Eds.), *Mineral Deposit Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Berger, B. (1992b). Descriptive model of Hot-Spring Au-Ag. En D. Cox y D. Singer (Eds.), *Mineral Deposit Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Berger, B. (1992c). Descriptive model epithermal quartz-alunite Au. En D. Cox y D. Singer (Eds.), *Mineral Deposit Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Bliss, J. (1992). *Developments in Mineral Deposit Modeling*. (Bulletin 2004) Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Boyle, R. (1979). The Geochemistry of Gold and Its Deposits. *Geological Survey of Canada*, 280, 584.
- Buenaventura, J. (1975). *Ocurrencias minerales de la región norte del departamento del Tolima*. Ibagué: Ingeominas.
- Buenaventura, J. (2001). Posibilidades metalogénicas auríferas en el territorio Colombiano. *VIII Congreso Colombiano de Geología*. Manizales.
- Buenaventura, J. (2002). *Memoria explicativa del mapa de recursos minerales de Colombia: minerales metálicos, preciosos y energéticos a escalas 1:500.000 y 1:1.500.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Camprubi, A., Gonzáles-Partida, E., Lavresse, G., Tritlla, J. y Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos hidrotermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVI(1), 10-18.
- Castro, H. y Lozano, H. (1995). Oro. En *Minerales estratégicos para el desarrollo de Colombia* 94-95. Bogotá: Ingeominas.
- Continental Gold. (2016). *Buritica*. Disponible en <http://www.continentalgold.com/es/proyectos/buritica/>
- Corti, C. y Holliday, R. (2004). Commercial aspects of Gold Applications: From Materials Science to Chemical Science. *Gold Bulletin*, 37(1-2), 20-26.
- Cox, D. (1992). Descriptive model or Porphyry Cu-Au. En D. Cox y D. Singer, *Mineral Deposits Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Cox, D. y Singer, D. (2002). *Mineral Deposit Models* (3ª ed., Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Cuellar, J. (1997). *Categorización de reservas del distrito aurífero de Taraira, Vaupés, Colombia*. Informe ejecutivo. Bogotá: Consorcio Consultores Unidos S.A J.V.C Geofísica Ltda.
- Ecooro. (2017). *Angostura*. Disponible en <http://www.eco-oro.com/sp/Angostura.asp>
- Fonseca, A. y Bradshaw, G. (2005). *Yukon Mineral Deposits Profiles*. Yukon: Yukon Geological Survey.
- Fundación Universitaria Agraria. (2004). *Trabajo escrito: el oro en Colombia*. Disponible en https://nanopdf.com/download/oro-en-colombia_pdf
- Garcés, H. (1995). *Geología económica de los yacimientos minerales - Yacimiento de Colombia - Minerales metálicos*. Medellín: Clave.
- Goldfarb, R., Baker, T., Dubé, B., Groves, D., Hart, G. y Gosselin, P. (2005). Distribution, character, and genesis of Gold Deposits in metamorphic terranes. *Economy Geology, 100th Anniversary Volumen*, 407-450.
- González, H. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia*. Bogotá Ingeominas.
- Gran Colombia Gold. (2016). Operations & Projects. Disponible en <http://www.grancolombiagold.com/operations-and-projects/colombia/default.aspx>
- Groves, D., Goldfarb, R., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. y Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13, 7-27.
- Grupo Mineros S. A. (2016). *Informe financiero 2016*. Disponible en <http://www.mineros.com.co/pdf/Informe-Financiero-2016.pdf>
- Guarín, G. (1971). *Ocurrencias minerales del departamento de Risaralda. Informe 1636*. Bogotá: Ingeominas.
- Guilbert, J. y Park, J. (1985). *The geology of ore deposits*. New York: Fremman and Company.

- Ingeominas. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales, escala 1:400.000*. Bogotá.
- Ingeominas. (2005). *Zonas potenciales para metales preciosos en Colombia*. Bogotá.
- Ingeominas. (2006). *Mapa geológico de Colombia, escala 1:2.800.000*. Bogotá.
- Ingeominas-Geominera. (2003). *Prospección geológica y geoquímica regional en el área de Mandé. Fase II*. Bogotá.
- Ingeominas y Universidad Industrial de Santander (UIS). (2005). *Plancha 55-El Banco, sur de los departamentos de Bolívar, Magdalena y Cesar*. Memoria geológica preliminar. Bogotá.
- Investing. (2017). Futuros oro. Disponible en <https://es.investing.com/commodities/gold>
- Klein, Y. y Hurbult, J. (1988). *Manual de mineralogía*. Barcelona: Reverté.
- Krauskopf, K. (1967). *Introduction to Geochemistry*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Lefebure, D. V. y Höy, T. (1995). British Columbia Mineral Deposits Profiles. *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume II - More Metallic Deposits*; British Columbia: Ministry of Employment and Investment.
- Lefebure, D. V. y Ray, G. E. (1995): *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume I - Metallics and Coal*. British Columbia: Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources.
- Lowell, J. D. y Gilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373-408.
- Lozano, H. y Pulido, O. (1987). *Recursos minerales de Colombia: oro* (tomo I). Bogotá: Ingeominas.
- Maksaev, V. (2004). *Pórfidos cupríferos. Depósitos de Cu (Mo) de gran tonelaje y baja ley*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Mateo, D., Morales, P., Avalos, A. y Haza, A. (2013). Nanopartículas de oro: aplicaciones y citotoxicidad in vitro. *Acta Toxicológica Argentina*, 21(2).
- Materials World. (2003). Gold. Applications and developments in the electronics, biomaterials and catalysis. *Materials World*, 11(2), 12-14.
- McDonald, E. (2007). *Handbook of gold exploration and evaluation*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Mendoza, H. y Jaramillo, L. (1979). Geología y geoquímica del área mineralizada de California, Santander. *Boletín Geológico*, 22(2), 3-52.
- Mosier, D., Sate, T., Page, D., Singer, D. y Berger, B. (1996). Descriptive model of Creede Epithermal Veins. En D. Cox y D. Singer, *Mineral Deposits Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Mosier, D., Singer, D. y Berger, B. (1992a). Descriptive model of Comstock Epithermal Veins. En D. Cox y D. Singer, *Mineral Deposit Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Mosier, D., Singer, D. y Berger, B. (1992b). Descriptive model of Sado Epithermal Veins. En D. Cox y D. Singer, *Mineral Deposits Models* (Boletín 1693). Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Muñoz, R. (1993). *Mineralizaciones filonianas auríferas en la franja entre San Martín de Loba, Río Viejo y Barranco de Loba*. Medellín: Ingeominas.
- Nekrasov, I. (1996). *Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits*. Brookfield: Taylor & Francis Inc.
- Oquendo, E. (1970). *Ocurrencias minerales en el noreste antioqueño*. Medellín: Ingeominas.
- Orrego, A. (1982). Geología y geoquímica del área mineralizada El Piso, Silvia, Cauca. *Publicaciones Geológicas Especiales X*. Bogotá: Ingeominas.
- Oyarzun, R. (1991). Mineralizaciones epitermales de metales preciosos. En R. Lunar y R. Oyarzun, *Yacimientos minerales. Técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración*. Madrid: Centro de Estudios Ramón Aceres.
- Panteleyev, A. (1996). Porphyry Cu-Au: Alkalic. En D. V. Lefebure y G. Ray, *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles. Metallics and Coal* (vol. 1). Columbia: Ministry of Employment and Investment.
- Panteleyev, A. (1996a). Hot-Spring Au-Ag. En D. V. Lefebure y T. Höy (Eds), *Selected British Columbia Mineral, Deposit Profiles, Metallics and Coal* (vol. 2). Columbia Británica: Ministry of Employment and Investment.
- Panteleyev, A. (1996b). Epithermal Au-Ag-Cu: High sulphidation. En D. V. Lefebure y T. Höy (Eds.), *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles. Metallic Deposits* (vol. 2). Columbia Británica: Ministry of Employment and Investment.
- Pulido, O. (1988). Geología y geoquímica del área de San Antonio, Cajamarca, Tolima. *Boletín Geológico*, 29(2), 42-46.
- Pulido, O. (1985). *Reconocimiento regional para mineralizaciones de oro diseminado en tres zonas de los departamentos de Caldas, Quindío, Tolima, Colombia*. Informe Técnico. Bogotá: Ingeominas.
- Ramdhor, P. (1980). *The ore minerals and their intergrowths* (2 vol.). Oxford: Pergamon Press.
- Red Eagle Mining. (2013). *Updated Technical Report on the San Ramon Deposit, Santa Rosa Project, Colombia*. Disponible en: http://es.redeaglemining.com/_resources/san_ramon_resource_estimate.pdf
- Red Eagle Mining. (2014). *Proyecto Aurífero Santa Rosa*. Reporte técnico. Disponible en: <http://es.redeaglemining.com/projects/santa-rosa/reserves-and-resources/>

- Renzoni, G. (1990). Secuencia aurífera de la serranía de Naquén: exploración geológica preliminar. *Boletín Geológico*, 30(2), 45-89.
- Rodríguez, G., Celada, C., Cossio, U., Muñoz, R. y Balceró, G. (2000). *Evaluación geológico minera del yacimiento aurífero de Miraflores, distrito aurífero de Quinchía, Risaralda*. Bogotá: Minercol-Ingeominas.
- Rodríguez, J. y Pernet, A. (1983). Recursos minerales de Antioquia. *Boletín Geológico*, 26(3), 1-116.
- Rosas, H. y Monroy, G. (1978). Recursos minerales de Colombia: oro y plata. *Publicaciones Geológicas Especiales*, Tomo 1. Bogotá: Ingeominas.
- Rose, A. (1979). *Geochemistry exploration*. Nueva York: Academic Press.
- Salinas, R., Lozano, H. y Solano, F. (1999). *Mapa metalogénico de Colombia. Informe 2259*. Bogotá: Ingeominas.
- Schroeter, T. y Poulsen, H. (1996). Carbonate-hosted disseminated Au-Ag. En D. V. Lefebure y T. Höy (Eds.), *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles. Metallic Deposits* (vol. 2). Columbia: Ministry of Employment and Investment.
- Servicio Geológico Colombiano. (2011). *Mapa de zonas potenciales integrales de Colombia para recursos minerales*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Mapa Metalogénico de Colombia, versión 2016*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Sinclair, W. (2007). Porphyry Deposits. En W. Goodfellow, *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods* (Special Publication 5). Ontario: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division.
- Stanton, R. (1972). *Ore petrology*. Nueva York: McGraw-Hill.
- S&P Global Market Intelligence. (2017). *Mining exploration spending drops to 11-year low*. Disponible en <http://www.mining.com/greenfields-share-exploration-spending-drops-record-low/>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2005). *Boletín estadístico de minas y energía 1994-2004*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2016). *Upme.gov.co*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/MSPO1.aspx
- United States Geological Survey (USGS). (2017). *Gold Statistics and Information*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gold/>
- Vergara, H. (1986). *Estudio de orientación geoquímica para scheelita en depósitos de tipo skarn, Payandé (Tolima)*. Ibagué: Ingeominas.
- Vergara, H. y Aucott, J. (1984). *Geoquímica y electroquímica preliminar de suelos en el área mineralizada El Pisno, departamento del Cauca*. Informe Interno. Cali: Ingeominas.



Calcopirita Aurífera con Pirrotina
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC