

CRITERIOS PARA LA EXPLORACIÓN DE DEPÓSITOS MINERALES TIPO PORFIDIO CUPRIFERO

YACIMIENTO DE REFERENCIA: EL TENIENTE

EXPLORATION CRITERIA OF PORPHYRY
COPPER MINERAL DEPOSIT TYPES
DEPOSIT OF REFERENCE: EL TENIENTE

FECHA DE RECIBIDO: 25 DE JULIO DE 2014
FECHA DE APROBADO: 15 DE AGOSTO DE 2014

JORGE IVÁN MÁRQUEZ QUIROGA

Estudiante en la Fundación Universitaria del Área Andina

AMAT DAVID ZULUAGA

Geólogo en la Fundación Universitaria del Área Andina



RESUMEN

Teniendo en cuenta, que la actividad magmática y de mineralización de los depósitos de pórfido cuprífero de la Franja Metalogénica Neógena abarca una edad entre los 12 y 4 Ma y está relacionada a la actividad plutónico-volcánica tardía del arco mioceno-pleoceno; es preciso que los depósitos ocurren dentro de zonas de alteración hidrotermal relacionadas con intrusiones multifásicas de stocks porfíricos cuyas composiciones varían de cuarzo-dioritas a las llamadas granodioritas. El yacimiento está emplazado en el flanco occidental de la Cordillera Principal en rocas de la Formación Farellones, formación que corresponde a la principal sucesión estratificada que domina la geología de superficie en sus inmediaciones. En cuanto a la litología del yacimiento, se tiene que el distrito es dominado por rocas volcánicas del Mioceno (Formación Farallones) las que son intruidas por rocas ígneas de composición intermedia. Son intruidas por las rocas del Complejo máfico El Teniente y, luego, por cuerpos félsicos. Se reconocen cuerpos de brecha ígnea y brechas magmático-hidrotermales en los contactos de los cuerpos félsicos con las rocas máficas. El Complejo de Brecha Braden, forma una pipa, intruyendo a las unidades anteriores. Por último, las rocas mencionadas son cortadas por diques de lamprófito y marcan el fin de los eventos de mineralización. Las alteraciones de la roca caja y mineralización del yacimiento El Teniente son productos de la sobreimpresión de diversos eventos de alteración y mineralización.

ABSTRACT

The magmatic activity and mineralization of porphyry copper deposits of the neogene metallogenic fringe covers an age between 12 to 4 My. and are related to the late plutonic-volcanic activity of the Miocene-pleiocene arc. The deposits occur in hydrothermal alteration zones related with multiphase intrusion of porphyry stocks which varied composition from quartzdiorites to graindiorites. The deposits is emplaced on the western flank of the main range, hosted in rocks of the Farallones formation which correspond to the main stratified succession that dominates the surface geology nearby. As for the deposit lithology, it follows that the district is dominated by volcanic rocks of the Miocene (Farallones formation) which are intruded by igneous rocks of intermediate composition. They are intruded by The Teniente mafic complex rocks and then by felsic bodies. Bodies of breccias igneous and breccias magmatic-hydrothermal are recognized, in the contacts of the felsic bodies with mafic rocks. Braden breccias Complex forms a pipe, intruding to the previous units. Finally, the above rocks mentioned are cut by dikes lamprophyre and mark the end of the mineralization events. Alterations of the host rock and mineralization of the deposit El Teniente are products of the superimposition of various events of alteration and mineralization.

INTRODUCCIÓN

La geología del Yacimiento hipogeo de cobre El Teniente pertenece al grupo de depósitos de cobre formado a fines del mioceno y es uno de los más grandes del mundo con recursos estimados de 75 Mton. Además de explotar cobre como mineral principal, se obtiene molibdeno como subproducto. Se encuentra emplazado en rocas intrusivas, piroclásticas, volcánicas y subvolcánicas correspondientes a la Formación Farellones, de edad miocena media a superior. Las principales fuentes explotables de Cobre en el mundo están constituidas por los depósitos de tipo pórfido cuprífero. Al momento de estudiar las características que componen este tipo de yacimientos, el margen continental chileno resulta totalmente adecuado para profundizar acerca de los aspectos referentes a la formación de pórfidos cupríferos, ya que pernocta un gran número de depósitos de este tipo. Por lo tanto la investigación del presente estudio tendrá como referencia el modelo del yacimiento “La Mina el Teniente” teniendo en cuenta la caracterización geológica, el contexto litológico, la geometría de los cuerpos mineralizados, la roca caja y mineralización asociada para así contextualizarlo y determinar las implicaciones de la exploración de nuevos depósitos minerales con características similares en el territorio Colombiano.

METODOLOGÍA

Este trabajo investigativo fue realizado en base a recopilación bibliográfica de la información relacionada con el depósito

mineral de referencia “El Teniente”, para su posterior síntesis, análisis e interpretación. A través de la caracterización de los rasgos generales del depósito de Pórfido Cuprífero más grande del mundo como lo es “El Teniente” se lograron obtener y analizar datos relevantes como la geología, ambientes tectónicos, aspectos mineralógicos, tipo de magmatismo y características geoquímicas de la roca hospedadora, lo cual nos ayudó a definir criterios de exploración válidos como el ambiente tectónico en el cual se formó el yacimiento, la geología estructural regional y local, las litologías presentes en el yacimiento y las mineralizaciones asociadas que nos permitieron determinar zonas que posean un ambiente tectónico, litológico, geoquímico y geofísico similar o equivalente en Colombia para así determinar áreas con potencial para la formación de este tipo de yacimiento.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL YACIMIENTO

Ubicada a 44 km de Rancagua, en la Sexta Región de Chile y enclavada a 2.500 metros sobre el nivel del mar, en plena cordillera de Los Andes, El Teniente es la mina subterránea de cobre más grande del mundo. Cuenta con 2.400 km de túneles, de los cuales se trabaja en mil. Alrededor de la latitud 70_20'W y longitud 34_04'S



Ubicación de la Mina El Teniente. Tomado de: Barahona Karen, comportamiento de vetillas de la mina el teniente. 2013

GEOLOGÍA LOCAL

El yacimiento está emplazado en el flanco occidental de la Cordillera Principal en rocas de la Formación Farellones, formación que corresponde a la principal sucesión estratificada que domina la geología de superficie en sus inmediaciones. De manera subordinada, existen en la zona depósitos laháricos no consolidados y flujos de lava de edad Plioceno-Pleistoceno, agrupados en la Formación Colón-Coya, y depósitos no consolidados recientes. Adicionalmente, numerosos cuerpos intrusivos miocenos, de tamaño y composición variable, afloran en toda el área y completan las unidades litológicas principales de este sector.

Las estructuras reconocidas en la inmediaciones del yacimiento son de carácter local y muestran un predominio de aquellas de orientación NE por sobre las de orientación NW. Éstas se consideran como parte de un corredor estructural, conocido como Zona de Falla Teniente, que se desarrolla en superficie con una dirección N65°E por alrededor de 14 km de largo y 3 km de ancho, entre la falla Agua Amarga y los ríos Teniente y Coya. Para la Zona de Falla Teniente se ha descrito un movimiento principal de transcurrencia dextral, con desplazamiento de hasta 1 km o más, y uno subordinado normal que alza el bloque suroriental. El yacimiento está emplazado en el límite NE de la Zona de Falla Teniente cuya terminación es poco conocida, aunque se considera que ésta sea probablemente contra el sistema de fallas Puquios-Codegua.



LEYENDA		ROCAS INTRUSIVAS		OTRAS ROCAS		SIMBOLOGÍA																
Relleño Reciente	Deposito de remoción (reciente)	Deposito de lavas (Plio-Pleistoceno)	Fin Farellones (Mioceno)	Brechas Hidrotermales	Brecha Braden (Plioceno)	Brechas indiferenciadas (Mioceno)	Diente (Mioceno)	Porfido Teniente (Mioceno)	Porfido Dioritico (Mioceno)	Monzonita (Mioceno)	Porfido Andesitico (Mioceno)	Porfido Laitico (Plioceno)	Cuerpos de Silice	Zona de Alteración	Cavidad Teniente	Area sin información	Laguna	Rio	Escarpe	Falla Inversa	Zona de falla	Labores mineras

Geología de la superficie en las inmediaciones del Yacimiento: El Teniente. Tomado de: Muños Marcia, petrogénesis de rocas intrusivas del yacimiento El Teniente.

LITOLÓGÍAS

El distrito es dominado por rocas volcánicas del Mioceno (Formación Farellones) las que son intruidas por rocas ígneas de composición intermedia.

En el área del yacimiento, es intruida por las rocas del Complejo Máfico El Teniente y, luego, por cuerpos félsicos. Se reconocen cuerpos de brecha ígnea y brechas magmático-hidrotermales en los contactos de los cuerpos félsicos con las rocas máficas. El Complejo de Brecha Braden, forma una pipa, intruyendo a las unidades anteriores. Por último, las rocas mencionadas son cortadas por diques de lamprófito y marcan el fin de los eventos de mineralización

COMPLEJO MÁFICO: EL TENIENTE (CMET)

El concepto de Complejo Máfico es introducido por Skewes y otros (2002). El CMET es la unidad litológica más extensa y donde se aloja el 80% de la mineralización. Corresponde a un conjunto de rocas del Mioceno Superior, sub-volcánicas de composición básica y afinidad toleítica, entre los que se tiene gabros, diabasas, pórfidos basálticos. También incluyen brechas de biotita. Se extiende verticalmente con forma de lacolito, de más de 2 km. Las rocas de este complejo, contienen plagioclasa, relictos de piroxeno y presentan una fuerte alteración potásica biotítica que les da su característica coloración grispartido a negro, presentan textura afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasa, los que varían en su tamaño. Las texturas de grano fino corresponderían a los márgenes del intrusivo y las de grano grueso a centro de éste.

Las características originales de la roca han sido obliteradas por la mineralización y alteración, de las cuales los minerales más comunes son biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita, y turmalina.

En la Tabla 1 se presenta una breve descripción de la diabasa, gabro y pórfido basáltico, correspondientes a las distintas unidades petrográficas que conforman el CMET.

Litologías	Características Macroscópicas
Diabasa	<p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura porfídica, fenocristales de plagioclasa tabulares entre 5% a 40 % aprox. Generalmente los fenocristales tienen un largo mayor a 2 mm, y la "masa fundamental" corresponde a cristales de plagioclasa de menor tamaño (< 1 mm).</p> <p>Rasgos Característicos: Su textura porfídica, independiente del tamaño de sus fenocristales o la proporción de ellos. Los cristales de la masa fundamental se pueden observar con lupa de mano.</p>
Gabro	<p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura equigranular. Los cristales son tabulares a aciculares.</p> <p>Varietades Texturales: Microgabro: Textura fina con cristales menores a 1 mm de largo. Gabro: Cristales mayores a 1 mm.</p> <p>Rasgos Característicos: Su textura equigranular, independiente del tamaño de sus cristales (Microgabro-Gabro).</p>
Pórfido Basáltico	<p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura porfídica. Presenta fenocristales tabulares de plagioclasa (5 a 20%), con largo mayor a 2 mm.</p> <p>Varietades Texturales: Pórfido Basáltico fino: Fenocristales tabulares a aciculares de plagioclasa de 1 a 2 mm de largo. Pórfido Basáltico Grueso: Fenocristales de plagioclasa con forma más cuadrada ("equant"), mayores a 2 mm de largo.</p> <p>Rasgos Característicos: Su textura porfídica. La masa fundamental afanítica la que le otorga una apariencia aterciopelada.</p>

Diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo Máfico El Teniente.. Tomado de: Barahona Karen, comportamiento de vetillas de la mina el teniente.

COMPLEJO FELSICO

Corresponden a un conjunto de los intrusivos subverticales miocenos a pliocenos con afinidad calcoalcalina y contenidos mayores al 56% de SiO₂.

PORFIDIO DACITICO

Antiguamente denominado Pórfido Teniente, Dacita Porfídica o Dacita corresponde a un cuerpo tabular subvertical que intruye al Complejo Máfico El Teniente, en orientación general nortesur, en la zona norte del yacimiento.

Muestra contactos tanto nítidos como irregulares y brechosos. Hacia el sur, el cuerpo se encuentra truncado por la Chimenea Braden. Corresponde a una roca de color gris claro a blanco y su textura puede ser porfídica idiomorfa y porfídica hipidiomorfa, con fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo. Dataciones U/Pb en circón, indican edad de cristalización de $5,28 \pm 0,10$ Ma

TONALITA

corresponde a un gran cuerpo que intruye al CMET al SE del yacimiento (SE de la pipa Braden) que también ha sido llamado Diorita Sewell

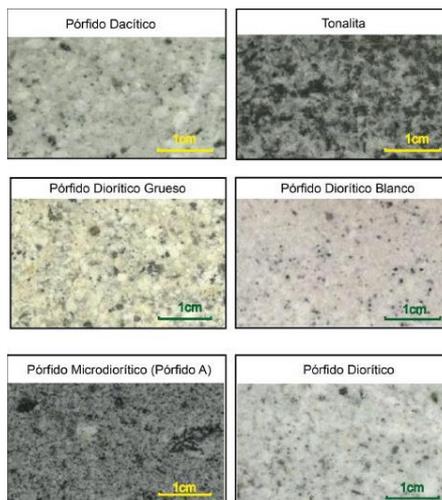
Es un stock de 200 m² cuyo núcleo es fanerítico y grada a porfídico hacia el exterior del intrusivo

PORFIDO DIORITICO

serie de stocks y diques menores, de gran extensión en la vertical, que se orientan en dirección N30°W en la parte norte y central del yacimiento (Diorita Central era la antigua denominación de estos últimos). Dataciones radiométricas U/Pb en circón, indican una edad de cristalización de $6,11 \pm 0,13$ Ma a $6,28 \pm 0,16$ Ma

PORFIDO MICRODIOROTICO

Anteriormente llamado Pórfido A (Spröhnle, 1990). Corresponde a una diorita de grano fino, con abundantes xenolitos de andesita y cúmulos de biotita. Está en contacto con la Tonalita y con el CMET. Dataciones U/Pb en circón, indican una edad de cristalización de $6,46 \pm 0,11$ Ma



Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo El Teniente. Tomado de: Barahona Karen, comportamiento de vetillas de la mina el teniente.

COMPLEJO BRECHA BRADEN

Correspondiente a una chimenea volcánica originada por la expulsión de gases que fragmentan la roca de caja. Tiene forma de cono invertido sub circular de diámetro de 1.200 m y profundidad de más de 2.150 m, desde la superficie. Su edad se estima en 4,7 a 4,5 Ma. Las dos grandes unidades geológicas que componen este complejo son las siguientes

UNIDAD BRECHA BRADEN

Consiste en brechas con fragmentos redondeados a sub angulosos mal seleccionados y cuya composición es andesítica, diorítica, dacítica y latítica con alteración hipógena propia, en una matriz de polvo de roca y cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros, principalmente pirita lo que la hace una unidad de baja ley.

UNIDAD BRECHA MARGINAL

Unidad que rodea a la Unidad Brecha Braden como un anillo, de 50 m a 60 m de espesor promedio el que disminuye en profundidad, hasta llegar a 10 m (Cuadra, 1986). El contacto entre ambas unidades de brecha es gradacional con un porcentaje variable de turmalina (Ojeda y otros, 1980). Sus fragmentos son angulosos a sub-angulosos polimícticos. Presenta alteración cuarzo-sericita-clorita en distintos grados y cantidades leves de anhidrita, yeso, sulfuros y tenantita-tetraedrita. Su cemento es de turmalina y cuarzo con cantidades menores de anhidrita, yeso, carbonatos, sulfuros y tenantita-tetraedrita. Los minerales de mena presentes son calcopirita, bornita, tenantita - tetraedrita y pirita.

CUERPOS DE BRECHAS

Se distinguen varios cuerpos de brecha según la composición de la matriz.

BRECHAS DE ANHIDRITA

de fragmentos de carácter polimíctico (de rocas máficas y félsicas alteradas). Su cemento consiste en anhidrita con menores cantidades de cuarzo, calcopirita, pirita y molibdenita. Se encuentra en el sector NE y SE del yacimiento. Habitualmente presenta leyes de cobre mayores a las de su entorno.

BRECHAS DE TURMALINA

Brechas de carácter polimíctico (rocas máficas y félsicas alteradas). En su cemento abunda la turmalina junto a anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Se encuentran preferentemente

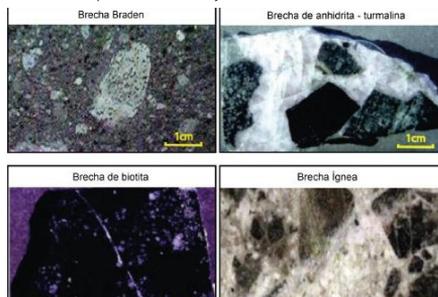
en el sector norte de la Chimenea de Brecha Braden. La brechización se habría producido entre las etapas de mineralización tardimagmática e hidrotermal principal. Mientras que las brechas de turmalina y cuarzo. Su formación se relaciona con la etapa hidrotermal tardía.

BRECHAS DE BIOTITA

Ubicadas en zonas de cobre hipógeno, rodeando a la Pipa Braden. Contienen fragmentos polimícticos, tanto de rocas intrusivas máficas como félsicas, los que están fuertemente biotitizados y sus minerales máficos han sufrido un reemplazo total por biotita. La biotitización se asocia con la infiltración de numerosas vetillas de biotita. Su cemento además contiene plagioclasa ± cuarzo ± bornita-calcopirita ± anhidrita ± yeso y también polvo de roca.

BRECHAS IGNEAS

Pueden contener en la matriz biotita predominante, en tal caso son llamadas brechas ígneas andesíticas, o bien, tener más anhidrita, feldespato y cuarzo, y corresponder a brechas ígneas dacíticas o dioríticas según su contenido de cuarzo y feldespato. Se encuentran preferentemente en los contactos entre el CMET y los pórfidos del Complejo Félsico que lo intruyen.



INTRUSIVOS MENORES

Los últimos eventos intrusivos reconocidos en el Yacimiento El Teniente corresponden a cuerpos de ocurrencia restringida y de carácter parcialmente estéril.

PORFIDO LATÍTICO

Corresponde a diques anulares de poca potencia de latita porfídica, aledaños a la Chimenea de Brecha Braden. Son cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. Contienen un 40% de fenocristales de feldespato y biotita. La edad K/Ar, de $4,96 \pm 0,25$ Ma, indica que su existencia es previa a la la Brecha Braden

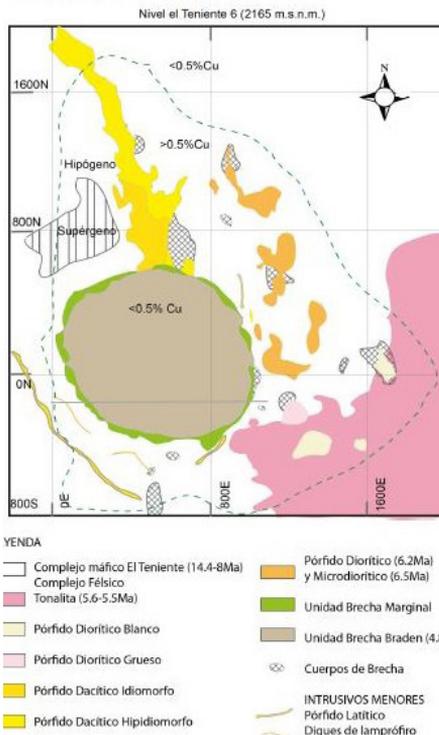
DIQUES DE LAMPROFIDO

Cuerpos tabulares de color gris verdoso, de textura porfídica fina con fenocristales aciculares de hornblenda, en una masa fundamental traquíutica compuesta por microlitos de augita y labradorita. Se ubican al sur de la Chimenea de Brechas Braden, con potencia variable de 1 a 2 m, manto sub verticalmente y alta continuidad en el rumbo. Cortan las rocas máficas, diorita Sewell y a la Chimenea de Brechas Braden, con contactos son nítidos. Dataciones K-Ar en roca indican una edad de 3,8 a 2,9 Ma

DIQUE DE ANDESITA

Cuerpo de forma tabular de potencia entre 0,5 y 1,0 m, con rumbo N60°E y continuidad de 500 m, de color gris negro y textura porfídica que corta a la Diorita Sewell en su sector sur.

En siguiente figura se muestran las litologías descritas anteriormente en una imagen en planta del Nivel Teniente 6 a 2165 m.s.n.m.



Geología Simplificada del Nivel 6. Tomado de: Muños Marcia, petrogénesis de rocas intrusivas del yacimiento el teniente

GEOMETRÍA DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS

Entre los tipos de discontinuidades, tales como fracturas y fallas, también se ubican las vetillas. Éstas corresponden a discontinuidades geológicas rellenas y selladas por minerales producto de la acción de fluidos hidrotermales los cuales además, alteran la roca caja generando halos en ella.

Las vetillas presentes en el yacimiento han sido ampliamente estudiadas, dado que contienen más del 70% de la mineralización de Cu del yacimiento e influyen en la estabilidad del macizo rocos. Según se ha observado en estudios de fragmentación del macizo

rocoso, las caras de las colpas encontradas en los puntos de extracción son definidas en más de un 90% por vetillas del stockwork.

El Teniente presenta un denso enrejado polidireccional (stockwork) de vetillas selladas con rellenos competentes, impermeables y soldados a la roca, en comparación con vetillas encontradas en minas a rajo abierto, que pueden presentar rellenos de baja cohesión. La mineralogía de la vetilla puede consistir en un mineral único o en grupos de minerales con proporciones variables, entre los que se encuentra anhidrita, bornita, calcopirita, carbonato, cuarzo, molibdenita, sericita, etc.

Según su ambiente de formación, cada vetilla adquiere características que permite distinguirlas. Así, por ejemplo, cuando la roca de caja se encuentra a altas temperaturas y por tanto tiene un comportamiento dúctil, como sucede en la etapa de alteración y mineralización tardimagmática, las vetillas tendrán bordes sinuosos e irregulares.

Finalmente, estas discontinuidades han sido clasificadas según sus características mineralógicas, halo y su origen genético, lo que permite clarificar la evolución del yacimiento y el ambiente de origen de las vetillas. En la presente sección se exponen los tipos de vetillas presentes en el yacimiento El Teniente.

CLASIFICACIÓN DE VETILLAS

Las vetillas del yacimiento son agrupadas de acuerdo a su espesor o potencia, a su extensión y a su composición, alteración y relaciones de contacto entre ellas. Estos parámetros permiten realizar

realizar distintas clasificaciones, las cuales se exponen a continuación:

SEGÚN ESPESOR DE LA VETILLA

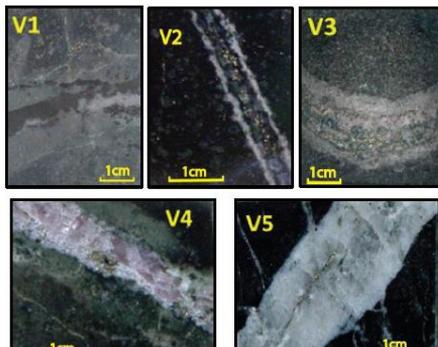
La clasificación de vetillas según el espesor es desarrollada por la Superintendencia de Geología de la División EL Teniente

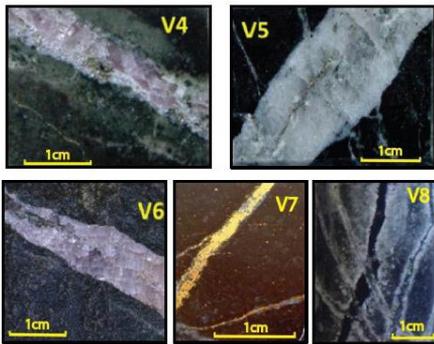
- Vetas: estructuras rectilíneas de longitud mayor 4,5 cm (largo de la preparación microscópica), y espesor superior a los 3 mm.
- Vetillas: estructuras lineales, de espesor comprendido entre 1 a 3 mm, y longitud igual o mayor a los 2,5 cm, con relleno continuo en toda su longitud.
- Microvetillas: longitud variable y ancho inferior a 1 mm, con trazado generalmente rectilíneo y relleno discontinuo. Sólo visibles en rocas de grano muy fino y aspecto afanítico.

SEGÚN TRAZA DE LA VETILLA

También pueden ser agrupadas según la extensión de su traza.

- Mayores: aquellas que se extienden por al menos 5 m de largo (el ancho de 2 labores).
- Intermedias: son aquellas mayores a 2,5 m (el ancho aprox de una labor).
- Menores: aquellas que no alcanzan a cruzar la labor.





Comportamiento de vetillas de la mina el teniente. Tomado de: Barahona Karen.

ALTERACIONES DE LA ROCA CAJA Y MINERALIZACIÓN ASOCIADA

La mineralización del yacimiento El Teniente es producto de la sobreimposición de diversos eventos de alteración y mineralización. En la actualidad se distinguen tres etapas hipógenas, llamadas Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía y una etapa Supérgena. Éstas, están relacionadas al emplazamiento de los intrusivos félsicos dacítico y diorítico, y al anillo de brecha hidrotermal de turmalina y brecha Braden. Producto de estos eventos de alteración, han originado las vetillas Tardimagmáticas, Principales y Tardías, que constituyen la evolución hipógena del yacimiento.

A) ETAPA TARDIMAGMITICA

Corresponde a la primera etapa de alteración-mineralización del yacimiento.

La mineralogía consta principalmente de biotita, con cantidades menores de anhidrita, cuarzo, clorita, albita, turmalina y sericita. La mineralización asociada a esta etapa ocurre diseminada y en mayor proporción en vetillas sin

halo de alteración, con una marcada zonación en torno al Pórfido Dacítico, con un núcleo rico en bornita, una zona intermedia con predominio de calcopirita y una zona periférica rica en pirita con abundante magnetita diseminada.

En el yacimiento, la distribución de esta etapa define claramente dos sectores. El primero se ubica en la mitad norte del yacimiento y está aparentemente relacionado con el emplazamiento del pórfido dacítico; se caracteriza por una zonación con gradiente de intensidad decreciente alrededor de un centro de intensa alteración potásica. Hacia los márgenes del yacimiento las asociaciones mineralógicas potásicas gradan a asociaciones de tipo propilítico. En el segundo, corresponde al sector sur, la zonación tardimagmática está enmascarada por las sucesivas etapas posteriores de alteración superpuestas, pero se puede visualizar una elongación noroeste en que los valores porcentuales máximos de penetrabilidad coinciden con el eje mayor del Pórfido Dacítico.

Esta etapa, se encuentra asociada a una alteración potásica, que se manifiesta en la Tonalita por el reemplazo de los cristales de plagioclasa por feldespatos potásicos, la ocurrencia de biotita secundaria y de feldespatos potásicos y biotita en su masa fundamental. En el Pórfido Dacítico, la alteración potásica se caracteriza por la pseudomorfización de las plagioclasas y por la formación de cúmulos irregulares de biotita secundaria y vetillas de cuarzo. En las "andesitas" o Complejo Máfico El Teniente, se manifiesta por la presencia de biotita, albita y cuarzo, destruyendo parcial o totalmente la textura original

de la roca.

B) ETAPA HIDROTHERMAL PRINCIPAL

Etapa que se sobrepone a la anterior y está relacionada con la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se define por la superposición de franjas de alteración filíca, ubicadas simétricamente. Su intensidad se encuentra determinada por la frecuencia de vetillas de cuarzo, anhidrita y sulfuros, que obliteran la mineralogía preexistente y texturas tardimagmáticas.

La mineralización corresponde a calcopirita, pirita y molibdenita subordinada, principalmente en vetillas y escasamente en forma diseminada en los halos de alteración. Las vetillas son de cuarzo, anhidrita y calcopirita, con muscovita, digenita y molibdenita en menor cantidad. Las vetillas hidrotermales principales (HP) se asocian a esta etapa.

En la roca de caja, la mineralogía es reemplazada por una asociación de cuarzo-sericita, con menor proporción de anhidrita y clorita. La asociación se desarrolla a expensas de la biotita tardimagmática y de los feldespatos de las rocas máficas y del pórfido Teniente respectivamente. En la diorita y Pórfido Dacítico, el feldespato potásico, plagioclasa y ferromagnesianos se encuentran alterados en forma similar y la textura original fanerítica y/o porfídica es reemplazada por una textura sacaroidal fina.

C) ETAPA HIDROTHERMAL TARDÍA

Relacionada espacial y genéticamente a la unidad Brecha Marginal. Se manifiesta

por la alteración cuarzo-sericita de los fragmentos de la brecha, así como por vetas y vetillas rellenas con anhidrita, yeso, turmalina, siderita, cuarzo y con halos de alteración cuarzo-sericita-clorita-calcita. Las vetillas contienen cuarzo, turmalina, anhidrita, sericita, clorita, yeso, carbonatos y menas de cobre, hierro y molibdeno, las cuales se distribuyen en una franja concéntrica al anillo de brechas y además como cemento matriz de la brecha hidrotermal de turmalina, y como parte de la alteración de sus fragmentos. Se divide en: una etapa temprana y una tardía propiamente tal asociada a la brecha de turmalina y constituye los valores máximos de penetrabilidad de la etapa tardía original.

D) ETAPA POSTUMA

Está relacionada a la consolidación de la Brecha Braden y se caracteriza por una asociación mineralógica constituida fundamentalmente por sericita, calcita y pirita en el cemento, y por la alteración sericitica de la fracción clástica. También existe un relleno de estructuras planares y de cavidades, con minerales de baja temperatura tales como yeso, siderita, ankerita, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina. La mineralización hipógena se encuentra en vetas y vetillas de pirita, calcopirita, tenantita-tetraedrita, molibdenita y galena-esfalerita con anhidrita como mineral de ganga predominante y de manera subordinada cuarzo, turmalina, yeso y carbonatos. Como minerales secundarios se encuentran sericita, clorita y calcita junto con diseminaciones de pirita y calcopirita.

E) ETAPA SUPERGENA

Esta etapa se distribuye con geometría elíptica de eje mayor NW en un área de 15 km² en la parte alta del yacimiento. La cuenca alcanza una profundidad entre los 100 y 600 m y un ancho que varía entre los 100 y 500 m. Se caracteriza por la lixiviación total de la anhidrita y la presencia de sericita y arcillas. La mineralización corresponde a calcosina gris, calcosina celeste y covelina azul, los cuales fueron generados por el reemplazo total de los sulfuros preexistentes. El paso fue gradual, reemplazando selectivamente a los sulfuros de cobre, primero a bornita y luego a calcopirita. La pirita durante el proceso de lixiviación no sufrió alteración. La edad de los eventos de alteración y mineralización se encuentra comprendida entre los 5,3 a 4,7 Ma

EDAD DE LA MINERALIZACIÓN

El yacimiento El Teniente se formó en cuatro etapas principales de alteración y mineralización hipogénas, relacionadas al emplazamiento de intrusivos de composición intermedia y de brechas hidrotermales, en rocas volcánicas andesíticas de la Formación Farellones (Mioceno).

Para consolidar el modelo geológico de la formación del yacimiento, se inició en 1983 un proyecto de dataciones radiométricas, que incluyó no solo rocas de este, sino también del área circundante. Los resultados obtenidos, hasta la fecha, indican que la Diorita Sewell es el intrusivo más antiguo del yacimiento, desarrollando una alteración potásica propia, cuya edad es de aproximadamente 7 Ma.

Esta última coincide con la de otros intrusivos dioríticos del área, lo que corresponde con la idea de que forma parte de un grupo de rocas de distribución regional. El evento principal de mineralización, relacionado al Porfido Teniente, tiene una edad de 4,7-4,6 Ma, en tanto que la Brecha Marginal y la Brecha Braden se formaron inmediatamente después.

El proceso de mineralización cesó antes de los 3,8 Ma, de acuerdo con la edad del dique de lamprofido, estructura claramente postmineral.

En el resto del área estudiada, se determinó la edad de unidades más jóvenes que la Formación Farellones, definiéndose la de un complejo volcánico-intrusivo denominado Unidad Cerro Montura (8,2-9,0 Ma) y la de la Formación Colon-Coya, donde se dato un horizonte de ceniza, intercalada en depósitos laháricos, cuya edad, complementada con la de trabajos anteriores, la sitúan en el Plioceno-Pleistoceno. Además, se determinó la edad de dos zonas de alteración cercanas a El Teniente, siendo la de Olla Blanca más antigua (9,0 Ma) y la de La Huifa (5,0 Ma) contemporánea con aquel.

RESULTADOS

Implicaciones en la exploración de nuevos depósitos minerales de Similares características.

CRITERIOS DE EXPLORACIÓN

Para el estudio de yacimientos de pórfido de cobre en Colombia hay que tener en cuenta aspectos como: litología, ambiente tectónico, rasgos estructurales entre otros.

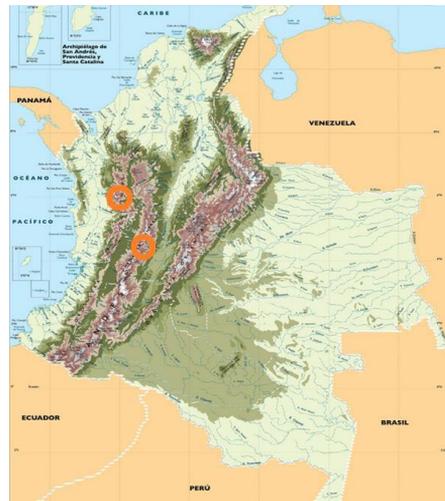
Estos yacimientos se originan por el emplazamiento de un cuerpo intrusivo de la corteza terrestre en condiciones de gran temperatura, están distribuidos en estructuras como vetas, fracturas y fallas. Generalmente estos yacimientos afloran en márgenes continentales destructivos especialmente en zonas de subducción. Relacionados a rocas como: granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas cuarcíferos, dioritas, stocks dioríticos - granodioríticos con textura porfídica y dacitas.

Teniendo en cuenta estos aspectos una de las zonas más propicias para estudiar estos yacimientos sería la que limita entre los departamentos del Tolima y Huila en especial la formación Saldaña (fs) compuesta por rocas hipoabísales y volcánicas que aflora al occidente del río Magdalena.

En la Cordillera Central colombiana, entre los ríos Saldaña y Magdalena. La Fm es una compleja secuencia volcánico-sedimentaria de bloques fallados, compuesta por tobas, aglomerados, flujos de lava, rocas sedimentarias continentales y marinas someras, y pequeños cuerpos porfíricos subvolcánicos. El tamaño de los cuerpos porfíricos andesíticos a dacíticos rara vez excede cuatro km², Petrográficamente, su composición varía desde tonalita hasta granodiorita y cuarzomonzonita, aunque algunas de las rocas gradan a diorita y basalto: algunas de las intrusiones son sieníticas.

La subducción jurásica produjo magmatismo y vulcanismo tardío, Sedimentos cretácicos y terciarios se depositaron discordantemente sobre las rocas ígneas.

Los yacimientos minerales están relacionados con los cuerpos intrusivos porfíricos jurásicos, que se emplazaron a lo largo de zonas de distensión en las tobas y otras unidades de la FS. La intrusión repetida produjo sobreimposición de alteración hidrotermal y mineralización. Algunas fallas normales, paralelas a las principales ramas del aulacógeno definen lugares para migración de fluidos y emplazamiento de minerales. Lo anterior nos presenta el significativo potencial para el descubrimiento de pórfidos cupríferos de cobre que se encuentra en la parte pacífica del territorio nacional colombiano.



Gracias al estudio de algunos comportamientos y factores geológicos se pudo identificar algunas posibles áreas de pórfidos cupríferos en Colombia, se tuvieron en cuenta algunos criterios de exploración con un porcentaje de incertidumbre que involucro características generales como bordes continentales y otras más específicas como minerales asociados.

CRITERIOS DE EXPLORACIÓN	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
Limite convergentes de placas	5	Formación de cadenas montañosas (orógeno volcano-plutónico), zona de suprasubducción.
Magmatismo	10	Pulsos magmáticos alcalinos y/o calcoalcalinos
Rasgos estructurales	15	Sistemas de fallas que me permitan el transporte de los fluidos mineralizantes
Litologías	30	Secuencias estratificadas volcano-sedimentarias y rocas plutónicas. Pórfidos cuarzomonzodioríticos, cuarzodioríticos, dacítico y microdiorítico
Mineralogía	40	En la mineralización tenemos comúnmente minerales de biotita, magnetita, clorita, cuarzo, anhidrita, sericita, piritita, calcopirita, calcosina, bornita, turmalina, molibdenita, especularita, presentes en forma de stokworks.

Se escogió la zona del pacifico en específico los departamentos del Tolima, Huila, Antioquia y parte del Choco, ya que se encuentran en un límite convergente de placas. Es una zona de grandes cadenas montañosas, donde son protagonistas la cordillera de los andes, la central y la occidental, por el tipo de rocas encontrado en esta región, en su mayoría rocas ígneas félsicas e intermedia se podría relacionar a pulsos magmáticos alcalinos y/o calcoalcalinos. Los rasgos estructurales son muy evidentes en la parte sur este de la cordillera central y a lo largo de la cordillera de los andes son fallas normales, paralelas a las principales ramas del aulacógeno que definen lugares para migración de fluidos y emplazamiento de minerales.

La litología está relacionada a la formación Saldaña que mineraliza a lo largo de la cordillera de los andes, esta a su vez ha sido agrupada en dos tipos:

rocas volcanosedimentarias y rocas hipoabisales.

Las volcanosedimentarias compuesta por una alternancia de limolitas, areniscas de color pardo, ferruginosas, calcáreas, tobas vítreo-cristalinas color gris pardo, aglomerados color pardo, andesitas, riolitas y dacitas,intercaladas con limolitas de tono rojizo a morado y arenitas cuarzofeldespáticas

Las hipoabisales constituidas por pórfidos de composición félsica e intermedia, los cuales afloran a manera de apófisis e intruyen las rocas estratificadas de la Formación Saldaña.

CONCLUSIONES

- Si bien, la anterior investigación permitió proyectar una visión acerca de lo que a exploración de nuevos depósitos minerales de tipo Pórfido Cuprífero se refiere, ya que a través de la caracterización de los rasgos generales del depósito Pórfido Cuprífero

más grande del mundo como lo es “El Teniente” se lograron obtener y analizar datos relevantes a través de los aspectos económicos y minero-metalúrgicos, y factores importantes que determinan este tipo de yacimientos como lo es el ambiente tectónico, aspectos mineralógico petrográficos, características geoquímicas de la roca hospedadora y geofísicas. Para la posterior obtención de los criterios de exploración, que permiten determinar yacimientos que posean un ambiente tectónico, litológico y geofísico similar o equivalente de áreas potenciales en el territorio Colombiano.

- Por consiguiente, por medio de la anterior recopilación, es preciso alegar que los condicionantes geológicos propicios para este tipo de yacimiento se albergan en la zona del Pacífico, especialmente en la zona del Chocó, Tolima, Huila, y parte de Antioquia.

- Toda la mineralización metálica económicamente importante tiene origen hidrotermal y en su mayor parte está relacionada a la intrusión de granitoides predominantemente de Tipo I o de la Serie de Magnetita, reflejando un origen ígneo subcortical y un alto estado de oxidación.

- Pulsos magmáticos subcorticales aumentan la cantidad de fluido hidrotermal, lo cual aumenta la mineralización.

- Estos yacimientos tienen su origen en el emplazamiento de un cuerpo intrusivo de la corteza terrestre en condiciones de gran temperatura, están distribuidos en estructuras como vetas, fracturas y fallas.

- Generalmente estos yacimientos afloran en márgenes continentales destructivos especialmente en zonas de subducción. Relacionados a rocas como: granitos.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

- Drago, G. y Villagra, P. (1988). Historia General del Mineral El Teniente: 1823 – 1988 (2a ed.). San Francisco de Mostazal, Chile: La Hornilla.
- MUÑOZ Marcia. (2011). Petrogénesis de rocas intrusivas del yacimiento el teniente y evolución del magmatismo cenozoico de Chile central (33°00’-34°30’s). Tesis para optar al grado de doctora en ciencias mención geología. Santiago de Chile.
- CODELCO, 2011. El Teniente Minería del Futuro. Santiago de Chile.
- Rojas, A. (2003) Porfido Teniente : Dos fases intrusivas características geológicas, petrográficas y geoquímicas, yacimiento el teniente. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias químicas, departamento de ciencias de la tierra. Concepcion, Chile.
- El Teniente Porphyry Copper molybdenum Deposit, Chile Central. Cannell, J. Bsc (Hons), L., Centre for Ore Deposit Research University of Tasmania, Australia.
- High Magma Oxidation State And Bulk Cristal Shortening: Key Factors In The Génesis Of Andean Porphyry Copper Deposits, Central Chile.
- Léxico De Geología Económica. Oyarzún. J. M., Geol. Dr. Sc. Universidad De La Serena (Chile).
- Magmatic and Hydrothermal Chronology of the Giant Río Blanco Porphyry Copper Deposit, Central Chile 2005.