



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE MERCURIO EN EL YACIMIENTO DE COBRE
Y ORO TAMBO DE ORO, PUNITAQUI, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

LUIS AQUILES ALEGRÍA OLIVERA

PROFESOR GUÍA:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VICTOR MAKSAEV JURCHUC
KATJA DECKART

Este trabajo ha sido financiado por la empresa HMC Gold SCM

**SANTIAGO DE CHILE
2018**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Luis Aquiles Alegría Olivera
FECHA: 29/01/2018
PROFESOR GUÍA: Brian Townley Callejas

DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE MERCURIO EN EL YACIMIENTO DE COBRE Y ORO TAMBO DE ORO, PUNITAQUI, CHILE

El yacimiento Tambo de Oro, ubicado en la cuarta región de Chile, a 114 kilómetros al sur de La Serena, corresponde a un sistema de vetas y brechas estratiformes con características epitermales y mesotermiales, de edad Cretácico Inferior. En el presente trabajo se realiza un estudio de la distribución y ocurrencia de Hg en el depósito, con énfasis en las unidades que controlan la mineralización y son explotadas.

Esta investigación se llevó a cabo en dos etapas principales, la primera consiste en determinar las especies minerales portadoras de Hg a través de análisis químicos y mineralógicos, mientras que en la segunda se desarrolla un modelo del yacimiento junto con interpolaciones de Hg perjudicial ($\geq 5\text{ppm}$) y otros elementos de interés.

Los resultados del análisis geoquímico y calcográfico indican que el Hg en Tambo de Oro puede ocurrir como impureza en sulfosales de la serie de la tetraedrita-tenantita, que a su vez se encuentran reemplazando completa o parcialmente a los granos de calcopirita a través de márgenes o planos de debilidad. También se tiene evidencia de mercurio en la especie coloradoita (HgTe), siendo este un teluro que está estrechamente asociado a la precipitación de oro nativo en Tambo de Oro.

A partir de los sólidos de mercurio y antimonio críticos ($\geq 5\text{ppm}$ y $\geq 10\text{ppm}$ respectivamente) generados, se determinó que las sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita se pueden encontrar a lo largo de todo el depósito de manera puntual, con una mayor probabilidad de ocurrencia en la zona entre las coordenadas 6584900 N - 6585100 N y 287450 E - 287550 E, y las cotas -100 y 100 m s. n. m. Por otro lado, los sólidos de mercurio y teluro críticos ($\geq 5\text{ppm}$ en ambos), indican que la coloradoita presente en Tambo de Oro se encuentra acotada a la zona de la brecha hidrotermal (HBx), en donde además habría ocurrencia de calaverita (AuTe_2).

Con los resultados obtenidos del estudio de concentrado de la planta, se plantea que un alto porcentaje de las sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita extraídas en el depósito se están depresando durante la flotación, mientras que las especies de teluro presentes en el depósito (coloradoita y calaverita) se están flotando junto a la pirita y calcopirita.

Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a mi profesor guía, Brian Townley, junto a los miembros de la comisión, Victor Maksaev y Katja Deckart, por su tiempo y apoyo durante el transcurso de este trabajo.

También, agradecer a Roguers Jara, superintendente del área de geología en Tambo de Oro, por darme la oportunidad de trabajar junto a su equipo en dos ocasiones y, sobre todo, por haber estado siempre presente y atento a las necesidades para llevar a cabo los objetivos de esta investigación.

A todos los miembros del área de geología, con quienes tuve la oportunidad de trabajar en dos ocasiones y, a pesar de haber estado colmados con trabajo, siempre tuvieron la mejor disposición para ayudarme a realizar de manera continua este estudio y para mantener un ambiente de trabajo agradable. Además, muy agradecido por todas las invitaciones y actividades que fueron realizadas durante los días que estuve en Punitaqui, sin ellas, no hubiese sido lo mismo.

A mi polola, la Verito, por su alegría, empatía, tolerancia e incluso su rabia. Además, por acompañarme durante todo este proceso, dándome consejos y prestándome ayuda cada vez que la necesité y, sobre todo, por estar conmigo y ser un pilar fundamental en mi vida.

Y por supuesto, a mi familia, Axileas, Chechi y Caty, quienes me han dado las herramientas necesarias y, a su vez, me han brindado el máximo apoyo durante todos estos años. Muy agradecido de tener esta familia y de haber podido sacar la carrera.

Tabla de contenido

Índice de tablas	V
Índice de figuras	VI
1 Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Ubicación y acceso	3
1.5 Generalidades.....	4
1.6 Trabajos anteriores.....	5
2 Marco Geológico	9
2.1 Geología Regional	9
2.1.1 Unidades estratificadas	10
2.1.2 Unidades no estratificadas	11
2.1.3 Estructuras	13
2.2 Geología del depósito Tambo de Oro	15
2.2.1 Rocas volcánicas.....	15
2.2.2 Rocas intrusivas.....	16
2.2.3 Rocas sedimentarias	16
2.2.4 Mineralización	17
2.2.5 Estructuras	22
3 Metodología.....	23
3.1 Base de datos	23
3.1.1 Robustecimiento de datos.....	24
3.1.2 Coordenadas	25
3.2 Estudio geoquímico	25
3.2.1 Análisis univariable	25
3.2.2 Análisis multivariable.....	25
3.3 Estudio calcográfico	26
3.4 Estudio de concentrado de planta	26
3.5 Distribución	26

4	Resultados.....	27
4.1	Base de datos	27
4.1.1	Robustecimiento de datos.....	29
4.2	Estudio geoquímico	30
4.2.1	Análisis univariable	30
4.2.2	Análisis multivariable.....	33
4.2.3	Correlación entre las unidades de óxidos de Hierro.....	39
4.3	Estudio calcográfico	41
4.4	Estudio de concentrado de planta	45
4.6	Distribución	48
5	Discusión	56
5.1	Base de datos	56
5.2	Estudio geoquímico	56
5.2.1	Análisis univariable	56
5.2.2	Análisis multivariable.....	57
5.3	Estudio calcográfico	58
5.4	Estudio de concentrado de planta	59
5.5	Distribución	60
6	Conclusiones.....	62
7	Bibliografía.....	63
8	Anexos.....	67
8.1	Características de minerales portadores de mercurio en Tambo de Oro.	67
8.3	Muestras calcográficas.....	68
8.5	Muestras de concentrado.	70
8.6	Muestra macroscópica de tetraedrita en Tambo de Oro.	70

Índice de tablas

Tabla 3.1: Límites de detección del método analítico ME-ICP41 (Cu corresponde a Cu-OG46) y Au-AA23 (en azul).	24
Tabla 4.1: Porcentaje de valores bajo el límite de detección.....	28
Tabla 4.2: Estadísticas de Hg en Tambo de Oro.	31
Tabla 4.3: Estadísticas de Hg en las unidades estériles.	31
Tabla 4.4: Estadísticas de Hg en las unidades mineralizadas.	32
Tabla 4.5: Estadísticas de los elementos de interés en Tambo de Oro.	33
Tabla 4.6: Coeficientes de correlación de Pearson en Veta masiva de cuarzo.	34
Tabla 4.7: Coeficientes de correlación de Pearson en Brecha hidrotermal.	35
Tabla 4.8: Coeficientes de correlación de Pearson en Skarn.	36
Tabla 4.9: Coeficientes de correlación de Pearson en Veta masiva de magnetita.	36
Tabla 4.10: Coeficientes de correlación de Pearson en Veta masiva de especularita.	37
Tabla 4.11: Coeficientes de correlación de Pearson en Brecha con matriz de magnetita.	38
Tabla 4.12: Coeficientes de correlación de Pearson en Brecha con matriz de especularita.	38
Tabla 4.13: Litología y leyes de las muestras de sondajes correspondientes a los cortes pulidos.	41
Tabla 4.14: Concentraciones de las muestras de concentrado de planta. Matriz de correlación de Pearson entre elementos de interés.	45
Tabla 4.15: Porcentaje de Hg, Sb y Te en las especies portadoras de mercurio en Tambo de Oro. También se indica la razón aproximada entre Hg y Sb o Te.	49

Índice de figuras

Figura 1.1: Faena minera Tambo de Oro. Fotografía tomada de Presentación TDO Visitas.....	2
Figura 1.2: Ubicación Tambo de Oro.....	3
Figura 1.3: Modelo para el desarrollo de fracturas en el Distrito Punitaqui. Tomado de González y Rebolledo, 2014.....	7
Figura 2.1: Mapa regional de la zona de estudio. Modificado de Emparán y Pineda (en edición).....	9
Figura 2.2: Mapa regional con las estructuras principales de la zona de estudio.....	14
Figura 2.3: Planta y sección tipo del modelo simplificado de Tambo de Oro.....	15
Figura 2.4: Veta masiva de cuarzo-pirita-calcopirita, MQV.....	17
Figura 2.5: Brecha hidrotermal, HBx.....	18
Figura 2.6: Skarn, Skn.....	19
Figura 2.7: Veta masiva de magnetita, MMV.....	20
Figura 2.8: Veta masiva de specularita, MSV.....	20
Figura 2.9: Brecha con matriz de magnetita, MBx.....	21
Figura 2.10: Brecha con matriz de specularita, SBx.....	21
Figura 4.1: Distribución de las muestras de sondajes de Exploración (rojo) y Producción (azul). En planta se presentan sólo los collares de las perforaciones, mientras que en perfil se destacan todas las muestras.....	27
Figura 4.2: Elementos anómalos en Tambo de Oro con respecto a la corteza terrestre.....	29
Figura 4.3: Regresión lineal entre la información entregada por el método analítico ME-ICP41 y ME-MS61.....	29
Figura 4.4: Gráficos de estadísticas univariadas de Hg. La línea discontinua representa la división de las poblaciones de datos. A) gráfico de frecuencia acumulada. B) gráfico de probabilidad normal.....	30
Figura 4.5: Diagramas de caja de Hg en las unidades mineralizadas y en el concentrado extraído de la planta.....	32
Figura 4.6: Diagrama de abundancia de elementos en unidades de óxidos de Fe.....	39
Figura 4.7: Mapa de distribución de muestras de MMV y MBx.....	39

Figura 4.8: Mapa de distribución de muestras de MSV y SBx.	40
Figura 4.9: Microfotografías de la muestra 26713. A) Tetraedrita con oro nativo en borde de calcopirita. B) Coloradoita con oro nativo entre fracturas de pirita. C) Microvetilla de coloradoita con oro nativo en grano de calcopirita. D) Tetraedrita en reemplazo en bordes de calcopirita; coloradoita con oro nativo en bordes de grano y vetillas.	42
Figura 4.10: Microfotografía de la muestra 26713 con análisis de microscopio electrónico de barrido.	43
Figura 4.11: Microfotografía de la muestra 71278. A) Tetraedrita entre granos de pirita. B) Tetraedrita reemplazando en un 80% a calcopirita entre granos de pirita.	43
Figura 4.12: Microfotografía de la muestra 71278 con análisis de microscopio electrónico de barrido.	44
Figura 4.13: Microfotografía de la muestra 8084 tomada con microscopio electrónico de barrido. Modificado de (Cornejo, en edición).	44
Figura 4.14: Microfotografía de la muestra C1. A) Coloradoita en borde de grano de pirita, con fracciones de pirita ocluida. B) Coloradoita con fracciones de pirita.	46
Figura 4.15: Microfotografía de la muestra C1. A) Coloradoita en paragénesis con pirita. B) Coloradoita con mineral gris ocluido.	46
Figura 4.16: Microfotografía de la muestra C3. A) Coloradoita en bordes de grano de pirita. B) Coloradoita en contacto con pirita.	47
Figura 4.17: Planta -5 [m] de modelo 3D del depósito Tambo de Oro.	48
Figura 4.18: Modelo 3D del depósito Tambo de Oro (Planta -5).	49
Figura 4.19: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en Tambo de Oro.	50
Figura 4.20: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en la unidad MQV.	51
Figura 4.21: Distribución de Hg y Sb críticos en la unidad HBx.	52
Figura 4.22: Distribución de Te crítico en la unidad HBx.	53
Figura 4.23: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en la unidad Skn.	53
Figura 4.24: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en la unidad Ox Fe.	54
Figura 4.25: Distribución de interceptos entre Hg y Sb críticos y Hg y Te críticos. Se incluye a la unidad HBx.	55
Figura 5.1: Abundancia relativa de elementos entre el concentrado en planta y el material de alimentación.	59
Figura 5.2: Modelo simplificado del proceso de concentración de planta en Tambo de Oro. ...	61

1 Introducción

Uno de los procesos más comunes utilizado prehistóricamente para la purificación del oro y otros metales es la fundición de éstos. Sin embargo, si el metal tratado contiene elementos nocivos para la salud, éstos se liberan durante el proceso, provocando un gran impacto a la población.

En la actualidad se sabe que el mercurio es un contaminante global y uno de los metales pesados más tóxicos. Es por esto que en el país se han adoptado iniciativas regulatorias con respecto a sus emisiones al medio ambiente. Dichas iniciativas afectan directamente a la minería en el precio de venta de los concentrados con alto contenido de mercurio y otros elementos dañinos.

El presente estudio nace a partir de la necesidad de la empresa HMC Gold para comprender y controlar la presencia de mercurio dentro de la faena Tambo de Oro (TDO), ubicada en el distrito minero Punitaqui, distrito en donde históricamente se llevó a cabo explotación de cinabrio HgS para la obtención de azogue en estado líquido (Higueras *et al*, 2015), dejando en evidencia la situación naturalmente anómala del elemento en la zona.

El área ha sido explotada desde 1780 con la apertura de la mina Azogues y desde entonces se han extraído más de 14.000 botellas de mercurio y 1.000.000 onzas de oro a cargo de diferentes compañías mineras (Documento Interno, 2017).

La empresa HMC Gold opera el yacimiento Tambo de Oro desde el año 2010, desde ese año se ha realizado numerosos trabajos de exploración, desarrollo y explotación de Au y Cu.

Geológicamente el distrito se ubica en una ramificación oriental de la falla regional de rumbo norte-sur El Romeral y se encuentra limitada por las fallas El Culen y Los Mantos, ambas de rumbo noreste. La zona está dominada por rocas volcánicas con intercalaciones sedimentarias de edad Cretácico Inferior, intruidas por cuerpos graníticos a dioríticos de la misma edad.

La mineralización en el yacimiento está asociada a un sistema hidrotermal que al menos evidencia dos eventos, uno epitermal y otro mesotermal, lo anterior se aprecia en vetas masivas de cuarzo, magnetita o specularita con una brechización hidrotermal posterior. Además, existe un cuerpo de skarn asociado al metasomatismo de una unidad de calizas.

La presencia de mercurio en el yacimiento está documentada, pero no existe claridad de su distribución dentro de los cuerpos mineralizados ni en que asociaciones mineralógicas se presenta. Además, los valores de mercurio que se obtienen en los concentrados son generalmente superiores a los límites aceptados por compradores internacionales, afectando directamente en el valor de venta de estos productos mineros. Es por esto que el objetivo de este trabajo consiste en determinar la ocurrencia y la distribución del mercurio, de manera que permita realizar una mejor planificación en la explotación y anticipar posibles aumentos en su concentración.

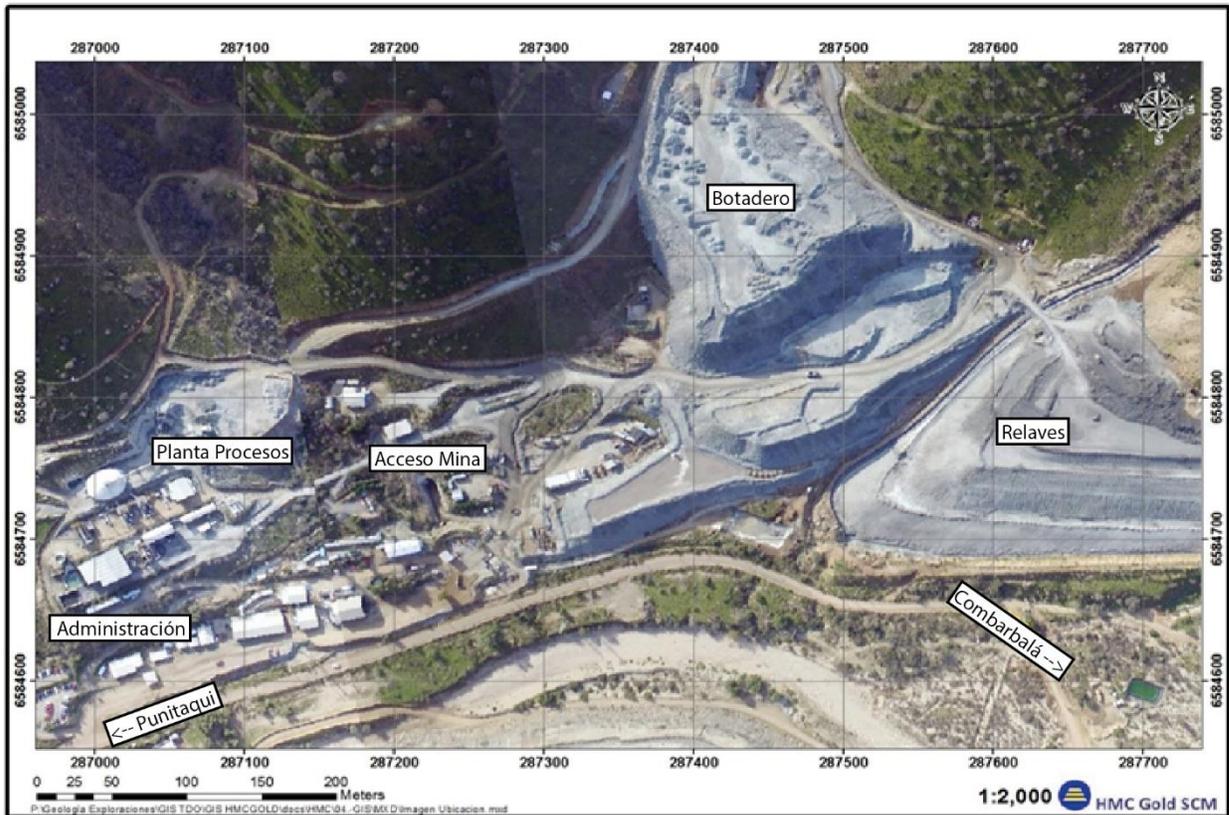


Figura 1.1: Faena minera Tambo de Oro. Fotografía tomada de Presentación TDO Visitas.

1.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene por objetivo principal determinar la distribución espacial y ocurrencia del mercurio en el depósito de Cu-Au Tambo de Oro.

1.2 Objetivos específicos

Identificar las asociaciones geoquímicas entre el mercurio y otros elementos químicos de interés presentes en las unidades que controlan la mineralización del depósito.

Determinar las especies minerales portadoras de mercurio en el depósito y la secuencia paragenética que éstos presenten con otros minerales.

Identificar si existe algún control de la mineralización de mercurio en el depósito; especialmente se pretende investigar la relación entre el contenido de mercurio y las distintas unidades mineralizadas dentro del depósito.

Establecer un modelo de distribución para la mineralización de mercurio en el depósito Tambo de Oro.

Determinar las especies portadoras de mercurio que afectan en la producción minera de la empresa.

1.3 Hipótesis

En el yacimiento Tambo de Oro existe ocurrencia de mercurio relacionada a eventos específicos y discretos de mineralización con distribución espacial asociable a etapas epitermales y mesotermiales, eventos que al ser reconocidos en el yacimiento pueden ser de utilidad en la planificación minera, a modo de enfrentar los problemas metalúrgicos y ambientales que conllevan elevadas concentraciones de mercurio.

1.4 Ubicación y acceso

La faena minera Tambo de Oro se ubica en el sector montañoso al sureste de Punitaqui, a 29 kilómetros al sur de la ciudad de Ovalle, en la Región de Coquimbo (IV Región), Chile.

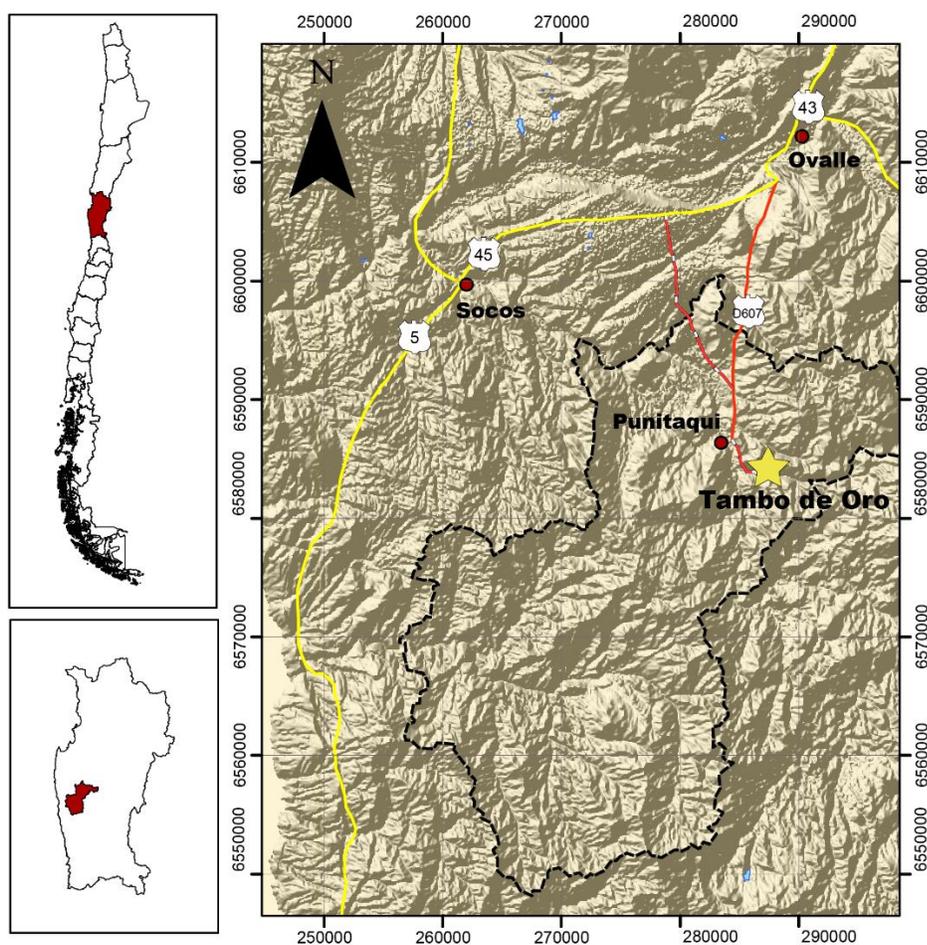


Figura 1.2: Ubicación Tambo de Oro.

Los accesos a la zona son expeditos y pavimentados hasta la ciudad de Punitaqui. Desde Santiago, se deben recorrer 372 kilómetros por la ruta 5 Norte, para luego conectar la ruta 45 hacia Ovalle, seguido por la ruta D-607 hasta llegar a Punitaqui. Desde la Serena, se deben recorrer 114 kilómetros hacia el sur por la ruta 43 y ruta D-607. Una vez llegado a Punitaqui se deben recorrer 3 kilómetros de camino de tierra hacia el sureste para llegar a la mina Tambo de Oro.

1.5 Generalidades

Tambo de Oro corresponde a una mina subterránea explotada mediante el método *Bench and Fill*, en donde el material se extrae por medio de banqueo y relleno. En este método la secuencia de explotación sigue dos direcciones, siempre se realiza en retroceso dentro de un mismo nivel y se efectúa de manera descendente dentro de un mismo sector (Jorquera, 2015). Según la clasificación de ENAMI realizada en base a la producción, Tambo de Oro se clasifica como mediana minería, produciendo concentrados de Au-Cu, del orden de 30.000 onzas de oro equivalente al año, con leyes medias de 5,36 g/T de Au y 0.25% de Cu, para una ley de corte de 2.05 g/T de Au. La producción proviene principalmente de un conjunto de vetas y brechas hidrotermales que, al igual que la antigua mina Azogues y Los Mantos, tienen altas concentraciones de mercurio.

El mercurio es altamente nocivo y puede llegar a dañar el sistema nervioso, las funciones cerebrales, el ADN y los cromosomas. Es por esto que el año 2013, Chile junto a otros países firmaron el Convenio de Minamata sobre el Mercurio. Este convenio tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropógenas de mercurio y sus compuestos. Con este fin, el convenio incluye una serie de medidas que buscan disminuir el impacto producido por el contaminante, entre las cuales se destaca el suministro, comercio y extracción de oro artesanal en pequeña escala, debido a la utilización de mercurio para recuperar oro en forma de amalgama (UNEP, 2014)

La operación minera en Tambo de Oro produce concentrados de Au y Cu, los cuales se venden a 3 empresas distintas según los valores de mercurio que presenten. El mejor escenario de venta para la empresa es vender concentrados que no superen los 100 ppm de mercurio. El segundo escenario corresponde a la venta de concentrados que tengan valores de mercurio entre 100 y 500 ppm, disminuyendo el precio al cual se venden éstos.

El proceso por el cual se concentra el material extraído de la mina consiste en flotación de minerales sulfurados, alcanzando una tasa promedio del 90 % en la recuperación de oro y cobre. Los principales minerales de sulfuro recuperados son la pirita por su asociación con el oro que se encuentra ocluido en ésta y la calcopirita por su contenido de cobre. Estudios realizados en la planta indican que los procesos utilizados pueden llegar a concentrar hasta 20 veces el contenido de Hg presente en el material de alimentación, lo que se traduce en que una concentración de 5 ppm de mercurio en la roca alcanza hasta 100 ppm en el material concentrado. Dicho esto, la ley de mercurio en la roca a partir de la cual la empresa se ve perjudicada corresponde a 5 ppm.

1.6 Trabajos anteriores

En el distrito minero Punitaqui se ha llevado a cabo una serie de estudios, visitas técnicas e informes geológicos y geofísicos con el fin de obtener un conocimiento más acabado de la zona y comprender la metalogénesis del yacimiento Tambo de Oro. A continuación se presentan los resultados y conclusiones más relevantes para esta investigación.

Thomas (1967) realiza uno de los primeros trabajos integrados de geología regional en el área de estudio correspondiente a la Hoja Ovalle, a escala 1:250.000, donde analiza la geología en la región comprendida entre los paralelos 30° y 31° S y meridianos 70°30' y 70°45' W. En su trabajo se hace mención a que la región está constituida principalmente por rocas estratificadas e intrusivas mesozoicas, a excepción de las Serranías Costaneras, donde afloran rocas metamórficas y graníticas paleozoicas, y en la parte nororiental, donde afloran extensas rocas graníticas paleozoicas.

Adriazola (1997) en su trabajo de título en el distrito minero Los Mantos de Punitaqui identifica al menos dos pulsos principales de mineralización controlados estructuralmente por fallas y una redistribución de los fluidos hidrotermales, así como también plantea que hay una relación entre las estructuras y la mineralización, definiendo dominios estructurales compresivos, de atrición y extensionales reactivados, resultantes de movimientos acumulados en sentido sinistral con un componente menor inverso y acumulación de presión de fluidos.

Caddey y Brockway (1998) realizan un estudio estructural del distrito, que incorpora a Tambo de Oro y las minas Los Mantos de Punitaqui y Delirio. Ellos concluyen que las condiciones regionales favorecieron el emplazamiento de diferentes pulsos de mineralización, predominando dominios con orientación N30°E, N40°W y NS. Las estructuras con orientación NE representan según estos autores las fallas maestras de primer orden, mientras que las estructuras con orientación NW están subordinadas a un cizalle conjugado. Las fracturas formadas en deformación frágil, asociadas a extensión EW, tienen una tendencia NS. Además, reconocen a lo menos cuatro pulsos tectónicos de deformación ocurridos durante el Cretácico inferior, de los cuales, los últimos son responsables de la formación de vetas epitermales a lo largo del contacto entre la secuencia volcánica-sedimentaria y el intrusivo del Cretácico Inferior.

Oyarzún *et al.* (2001) realiza un muestreo geoquímico de suelo, roca y minerales de mena, con el objetivo de reconocer los mejores trazadores geoquímicos para la zona y ubicar las áreas de mayor interés económico. En su estudio se concluye que el Au, Cu, Ag, Hg, Sb y As son los mejores trazadores geoquímicos para la detección de cuerpos mineralizados no aflorantes. Además, se reconoce que el mejor prospecto corresponde al área norte del distrito (sector Culebra – Viña Vieja), donde sondajes muestran la existencia de recursos minerales de Au y Cu del orden de 9 Mt.

Sillitoe (2003) realiza una revisión detallada de los depósitos de óxidos de Fe-Cu-Au andinos y plantea que la zona en donde está ubicado el depósito Tambo de Oro corresponde a una franja metalogénica asociada a yacimientos de cobre y oro de tipo IOCG que se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa desde Santiago hasta el sur de Antofagasta. Además, propone que los depósitos de Fe-apatita y los de Cu-Au-óxidos de Fe pertenecen a un mismo clan de depósitos, en donde los primeros representan un miembro extremo deficiente en Cu.

Higueras *et al.* (2004) desarrolla un estudio de la evaluación ambiental de la extracción de mercurio, cobre y oro en los distritos de Andacollo y Punitaqui. Los resultados obtenidos indican la contaminación de mercurio en la zona de Punitaqui es diferente a la del distrito de Andacollo. El Hg tiene un origen primario y debe haber sido liberado en primer lugar durante la explotación de la mina Azogue. La segunda causa de la contaminación de mercurio en la zona corresponde a los procesos de flotación y lixiviación de minerales de Cu-Au.

Collao *et al.* (2006) estudia la presencia de tetraedrita mercurial en mina Carmen de Andacollo, Región de Coquimbo. Con su investigación concluye que el Hg en muestras de concentrados de la mena hipógena de la mina, se encuentra incorporado en minerales de la serie tetraedrita - tenantita, en contenidos de 4 a 12,6 % en peso. Estos minerales se encuentran asociados con calcopirita.

Emparán y Pineda (2006) remapean el área a una escala de 1:100.000, correspondiente a la Hoja Andacollo – Puerto Aldea, abarcando entre los 30° y 30°30' S. En este trabajo se reconoce la geología expuesta por Thomas (1967) y se redefinen algunas unidades geológicas eliminando el Grupo Ovalle, incluyendo los Estratos de Tamaya y Estratos de El Reloj en la Formación Arqueros. Además, se incluye un estudio estructural con énfasis en los Sistemas de Falla Romeral y un estudio económico, destacando la presencia de yacimientos y ocurrencias de minerales ricos en cobre, oro, mercurio, cobalto y manganeso. Emparán y Pineda (en edición) generan la Hoja Ovalle – Peñablanca a escala 1:100.000, cubriendo entre los 30°30' y 31° S.

Eugene Tobbey (2010) plantea que en el depósito Tambo de Oro existen vetas de cuarzo masivo tardías con pirita, calcopirita y presencia de oro, que en gran parte han sido sometidas a procesos de brechización originados por eventos tanto de origen tectónico como por procesos hidrotermales.

Ormeño *et al.* (2011) realiza un estudio geológico-metalogénico en Tambo de Oro, en donde concluye que la principal unidad litológica reconocida en el área corresponde al Complejo Hipabisal El Pidén, emplazado en la Formación Arqueros. El complejo incluye unidades hipabisales tabulares, elongadas en el eje NS, muy masivas y homogéneas, con pocas variaciones litológicas.

Paula Cornejo (2012) realiza un estudio petrográfico y calcográfico solicitado por la empresa HMC Gold para identificar secuencias paragenéticas y la abundancia relativa de elementos en 16 muestras de sondajes. La asociación más común en las muestras corresponde a pirita, calcopirita, magnetita y hematita especular con variación a mushketovita. En una de las muestras calcográficas determina la ocurrencia de un mineral gris (que más adelante en este texto se describe como coloradoita [HgTe] y tetraedrita [(Cu,Fe)₂Sb₄S₁₃]) con abundante oro nativo, reemplazando calcopirita y pirita en los márgenes de los granos.

Chavez (2013) determina que hay por lo menos cuatro estilos y generaciones de brechas desarrolladas en Tambo de Oro, siendo las más tardías las de mayor productividad. La secuencia general de desarrollo de brechas y mineralización que son, desde la más temprana a tardía:

- Falla Distrital
- Brecha de falla (localmente llamada “diatrema”)
- Brecha con clastos de roca caja (Andesita)
- Brecha con cuarzo sin mineralización
- Brecha con cuarzo con sulfuros finos y gruesos.

Además, observaciones en sondajes indican que las estructuras que hospedan la mineralización de Au-(Cu) consisten en relleno de fallas distritales de orientación norte-sur, con manteos subverticales. Tal relleno consiste en roca molida a brechizada, con clastos de varios tipos de roca. Por último, plantea que existe desarrollo de cuerpos de skarn, con valores interesantes pero erráticos de sulfuros \pm Au, sumado a que el reemplazo de rocas sedimentarias-volcánicas ha producido zonas con pirita-epidota-clorita representando metasomatismo de Fe^{++} , así como también hay zonas de abundante magnetita con Cu y Au.

González y Rebolledo (2014) realizan un estudio estructural en el Distrito Punitaqui, concluyendo que las rocas alojadas en éste se encuentran afectadas por 5 etapas de deformación. Además, indican que el sistema mineralizado principal se desarrolló de manera contemporánea con un proceso de acortamiento submeridiano y extensión EW, en donde se produce la intrusión de vetas de cuarzo, hierro y la mineralización de oro del distrito Punitaqui.

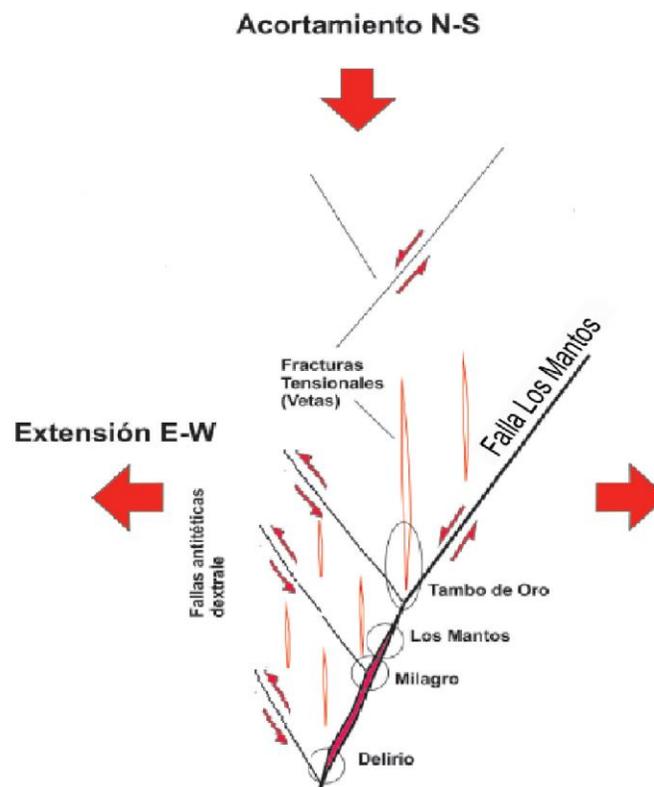


Figura 1.3: Modelo para el desarrollo de fracturas en el Distrito Punitaqui. Tomado de González y Rebolledo, 2014.

Campos (2014) realiza un estudio de termometría de inclusiones fluidas, concluyendo que los fluidos en el depósito son ligeramente menos salinos respecto a fases poco salinas de depósitos IOCG (Manto Verde) y muy similares a depósitos epitermales de baja salinidad. Además, plantea que la abundante ocurrencia de magnetita, clorita y calcita en algunas muestras, indican la presencia de fluidos hidrotermales de tipo IOCG tardíos. En base a los resultados determina que existe un evento caracterizado por la inyección de fluidos ricos en óxidos de hierro con calcopirita, pirita y oro, asociados a un sistema hidrotermal con características de IOCG que se reconocen tanto en vetas aisladas como originando zonas de brechas que, si se emplazan en zonas con presencia de sedimentos calcáreos de la Formación Arqueros, dan origen a zonas de skarn locales.

Sillitoe (2015) describe cuatro estilos principales de mineralización dentro del distrito minero Punitaqui, asociados a las brechas de orientación norte-sur, así como también a las secuencias volcano-sedimentarias:

- **Vetas de cuarzo-pirita**

Vetas compuestas principalmente por cuarzo gris blanco y pirita cristalina masiva, conteniendo los valores más altos de oro, así como también valores moderados de cobre, presente en forma de calcopirita.

- **Vetas de magnetita—especularita**

Vetas masivas de óxido de hierro que contienen algo de cuarzo, pirita y calcopirita. Presentan valores de cobre y oro en menor cantidad que las vetas de cuarzo-pirita. Los óxidos de hierro contenidos varían entre magnetita, especularita y mushketovita.

- **Skarn de cobre y granate**

Lentes de skarn, dominados por granate andradídico, que contienen mineralización de cobre oxidado en superficie. Generalmente presentan diópsido junto con epidota retrógrada, magnetita, calcita y minerales sulfuros dominados por calcopirita y menor pirita. Los valores de oro están presentes en menor cantidad.

- **Mineralización diseminada de cobre en Caliza**

Unidad de caliza con calcopirita finamente diseminada y bornita, así como también minerales sulfuros presentes en las fracturas rellenas con calcita.

Paula Cornejo (en edición) realiza un estudio calcográfico y petrográfico de 26 muestras seleccionadas por la empresa HMC Gold. Sumado a esto, realiza un análisis con microscopio electrónico (SEM), con el cual, mediante una interpretación de los resultados da a conocer la existencia de tetraedrita y coloradoita en el depósito.

2 Marco Geológico

2.1 Geología Regional

La geología de la región de estudio, que ha sido descrita por Thomas (1967) y modificada por Emparán y Pineda (2006), se caracteriza por presentar franjas de unidades volcánico-sedimentarias con orientación NS del Jurásico ubicadas en el borde oeste y del Cretácico Inferior ubicadas hacia el este. El contacto entre estas unidades se encuentra controlado por la falla regional Romeral, siendo ésta, la estructura principal de la región. Al oeste de la falla se emplazan cuerpos intrusivos del Jurásico al Cretácico Inferior datados en 127 a 151 Ma, mientras que al este de la falla afloran intrusivos graníticos a dioríticos del Cretácico Inferior datados en 109 a 112 Ma (Emparán y Pineda, en edición).

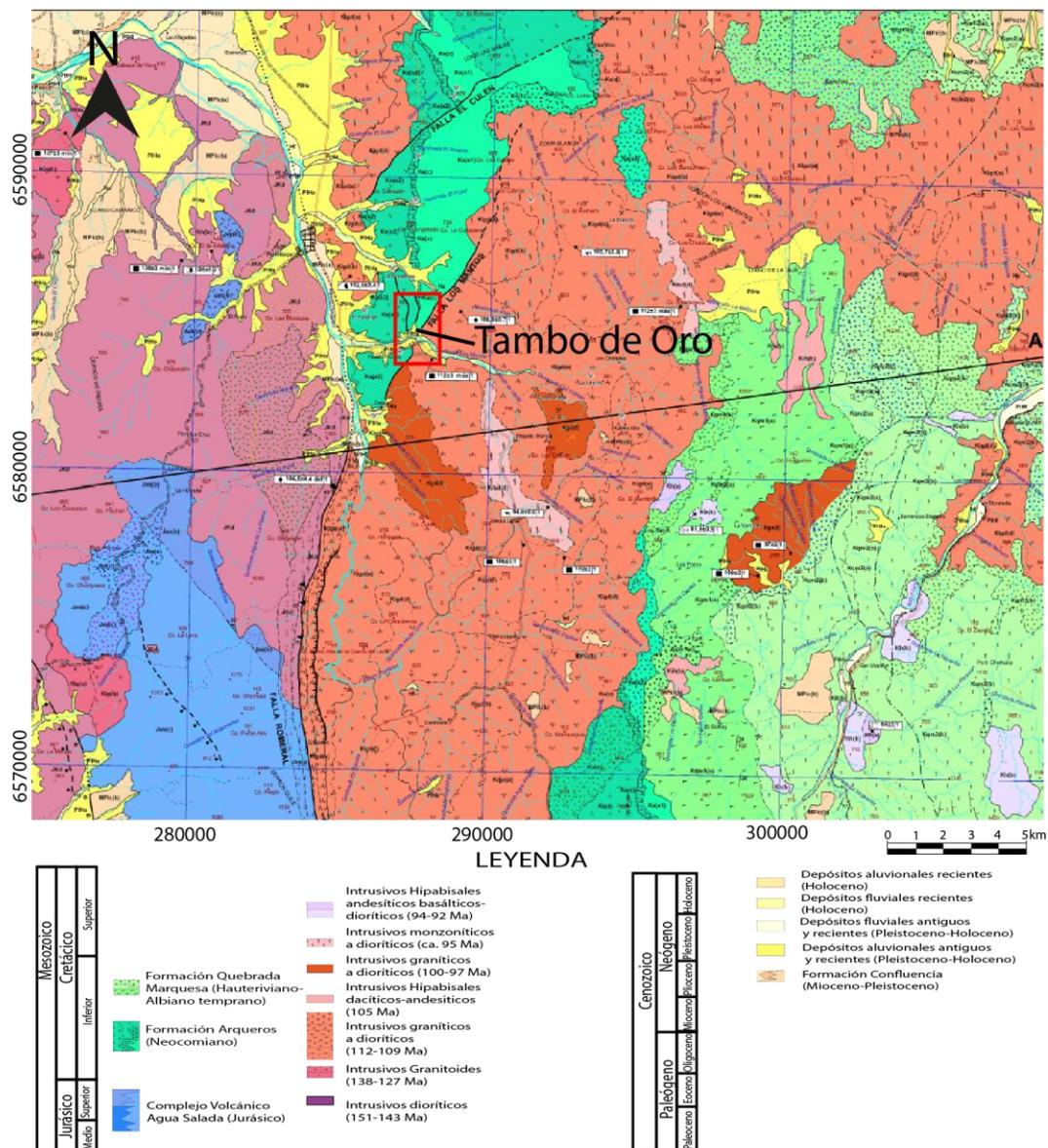


Figura 2.1: Mapa regional de la zona de estudio. Modificado de Emparán y Pineda (en edición).

2.1.1 Unidades estratificadas

Complejo Volcánico Agua Salada (Jurásico) (Emparán y Pineda, 2000)

Secuencia de rocas volcánicas y subvolcánicas continentales, andesíticas y dacíticas, con escasas intercalaciones de areniscas y lutitas. Dentro del complejo existen tres dominios, el primero presenta alternancia de andesitas y tobas, con escasas areniscas y calizas intercaladas. Un segundo dominio está constituido principalmente por ignimbritas, con intercalación de andesitas y escasos filones andesíticos. El último dominio corresponde a rocas subvolcánicas constituidas por andesitas porfíricas, pórfidos dioríticos, pórfidos andesíticos y microdioritas formando stocks, potentes filones y diques.

Formación Arqueros (Neocomiano) (Aguirre y Egert, 1962; modificada por Emparán y Pineda, 2006)

Secuencia de rocas volcánicas de composición andesítico-basáltica con intercalaciones sedimentarias marinas. Dentro de la formación se pueden encontrar andesitas caracterizadas por fenocristales de plagioclasa centimétricos frecuentemente referidas como “ocoítas”, basaltos, andesitas basálticas, andesitas porfíricas, hialoclastitas y peperitas. Además, existen niveles de tobas y brechas piroclásticas con intercalación de lavas de piroxeno, de acumulación subaérea. La secuencia sedimentaria marina presente incluye calizas y areniscas subordinadas, en parte fosilíferas, marinas, con intercalación de lutitas y tobas.

Por el contenido fosilífero de *trigonias*, Emparán y Pineda (1999) le asignan una edad Neocomiana.

Formación Quebrada Marquesa (Hauteriviano – Albiano temprano) (Aguirre y Egert, 1965; modificada por Emparán y Pineda, 2006)

Secuencia sedimentaria y volcánica, principalmente continental de 1.000 m de espesor, de color pardo rojizo. Cubre en aparente concordancia a la Formación Arqueros, aunque en general el contacto es por falla (Emparán y Pineda, 2000). Se divide en dos miembros, el primero contiene ignimbritas, tobas de caída y brechas piroclásticas, con escasas intercalaciones de andesitas, mientras que el segundo miembro incluye andesitas de anfíbola-piroxeno y de anfíbola, porfíricas y afaníticas, brechosas, así como también tobas de caída, ignimbritas poco soldadas y escasas tobas laminadas, representativas de una oleada piroclástica. La edad de esta Formación está indicada por la fauna fósil marina, Neocomiana identificada en sus niveles basales y por la relación de intrusión con el plutón datado en ca. 111 Ma en el área La Serena-La Higuera. Emparán y Pineda (2000) la ubican en el rango Neocomiano-Albiano temprano.

Formación Confluencia (Mioceno-Pleistoceno) (Rivano y Sepúlveda, 1991)

Depósitos continentales fluviales, aluvionales y lacustres, que incluyen conglomerados medios a muy gruesos, con matriz intersticial de arena muy fina a muy gruesa (fluvial), brechas matriz soportadas gruesas a muy gruesas, oligomícticas, con mediana a baja consolidación (aluvional) y areniscas arcósicas finas y areniscas calcáreas muy finas, alternadas en estratos (lacustre).

De acuerdo a la relación lateral con los depósitos marinos de formaciones neógenas, se le asigna una edad Mioceno-Pleistoceno a esta formación (Rivano y Sepúlveda, 1991)

Depósitos aluvionales y fluviales antiguos y recientes (Pleistoceno-Holoceno) (Emparán y Pineda, en edición)

Brechas polimícticas con matriz de arena y limo, débilmente consolidadas y no consolidadas, formando conos en la salida de quebradas, mientras que los en los depósitos fluviales se incluyen gravas gruesas y muy gruesas polimícticas con abundante matriz de arena, débilmente consolidadas y no consolidadas.

Depósitos aluvionales y fluviales recientes (Holoceno) (Emparán y Pineda, en edición)

Brechas no consolidadas polimícticas con matriz de arena y limo, mientras que los depósitos fluviales incluyen gravas gruesas y muy gruesas, polimícticas, con abundante matriz de arena, no consolidadas.

2.1.2 Unidades no estratificadas

Intrusivos dioríticos (151-143 Ma; Jurásico Superior) (Emparán y Pineda, en edición)

Monzodioritas cuarcíferas de anfíbola-piroxeno y de piroxeno-biotita, de dos piroxenos, diorita cuarcífera de piroxeno-biotita-anfíbola y pórfido monzodiorítico cuarcífero de anfíbola-piroxeno-biotita.

Intrusivos Granitoides (138-127 Ma; Neocomiano) (Emparán y Pineda, en edición)

Plutones aislados de composición granodiorítica, con presencia de anfíbola-biotita-piroxeno y pórfidos granodioríticos de biotita-anfíbola. También incluye sienogranitos de biotita y, en parte, monzogranitos de anfíbola-biotita.

Intrusivos graníticos a dioríticos (112-109 Ma; Cretácico Inferior tardío) (Emparán y Pineda, en edición)

Plutones de variadas dimensiones en el lado oriental de la Falla Romeral, que incluyen dioritas, tonalitas, monzodioritas, monzodioritas cuarcíferas, granodioritas, monzonitas y monzogranitos de diferentes composiciones.

Intrusivos hipabisales dacíticos-andesíticos (105 Ma; Cretácico Inferior tardío) (Emparán y Pineda, en edición)

Stocks, filones mantos y diques, incluyendo pórfidos andesíticos de anfíbola-piroxeno, de anfíbola, de piroxeno-anfíbola y pórfidos microdioríticos de anfíbola.

Intrusivos graníticos a dioríticos (100-97 Ma; límite Cretácico Inferior/Superior) (Emparán y Pineda, en edición)

Stocks de monzogranitos de anfíbola-biotita.

Intrusivos monzoníticos a dioríticos (ca. 95 Ma; Cretácico Superior temprano) (Emparán y Pineda, en edición)

Stocks elongados de diorita cuarcífera de anfíbola-piroxeno y diorita.

Intrusivos hipabisales andesíticos basálticos-dioríticos (94-92 Ma; Cretácico Superior temprano) (Emparán y Pineda, en edición)

Stocks, pequeñas cúpulas y diques. Incluyen andesitas, basaltos y dioritas de composición variada. Además, presenta dos subunidades con texturas diferentes, una “ocoítica” y otra porfírica-afanítica.

2.1.3 Estructuras

Falla Romeral (Bookstrom, 1977)

Corresponde a un sistema de fallas aparentemente independientes, de orientación general NS, cuya traza fundamental pasa por el centro del valle de Punitaqui, inmediatamente al oeste del área de estudio, separando los dominios estructurales regionales. En este sector, la falla está cubierta por depósitos aluviales del Mio – Plioceno, Pleistoceno y Holoceno, quedando expuesta al sur de Punitaqui. Esta falla está constituida por franja de rocas protomiloníticas – miloníticas (Emparán y Pineda, 2006). Se ha medido foliación en las milonitas, con rumbos variables NS a N18W, con inclinaciones que varían de la vertical a 55°E (Ormeño *et al.*, 2011).

El sistema de Falla Romeral se correlaciona por el norte con el Sistema de Fallas de Atacama, a la cual se le ha determinado un movimiento sinistral, con desplazamientos horizontales de 34 km entre Paposo y Blanco Encalada (Emparán y Pineda, 2000; Emparán y Pineda 2006).

La edad del cizalle en esta falla se ha determinado en milonitas mediante dataciones de K/Ar en roca total de 115 ± 4 Ma y una edad en biotita de 113 ± 3 Ma. Estas edades se interpretan como indicativas de una fase de deformación dúctil de la Zona de Falla Romeral durante el Cretácico Inferior (Emparán y Pineda, 2000). Al sur del área de estudio, se ha datado una franja de rocas miloníticas usando el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita, arrojando una edad de $106,5 \pm 0,4$ Ma, interpretada como edad de la deformación de la roca (Emparán y Pineda, en edición).

Falla Los Mantos

Falla con rumbo NE y manteo variable entre 55° y 80° W. A través de esta falla se emplaza el Plutón del Este en su parte más occidental, poniéndose en contacto con las rocas del Complejo Hipabisal El Pidén, al sureste de la zona de estudio.

En el sector de la mina los Mantos esta estructura constituye un sistema de fallas ligadas, definidas por superficies de fallas interconectadas y anastomosadas, distintos tipos de brechas de falla y zonas de rocas fracturadas (Adriasola, 1997). Además, se observan rocas miloníticas a ultramiloníticas ricas en biotita, ubicadas entre rocas microdioríticas y plutónicas (Ormeño *et al.*, 2011).

Al noreste de la zona de estudio, la traza de la falla es interpretada por la presencia de un dique tonalítico de unos 30 metros de ancho, aspecto fresco, que corta dioritas cuarcíferas parcialmente blanqueadas, las cuales están muy fracturadas y localmente disgregadas, generando brechización y salbanda de falla (Ormeño *et al.*, 2011).

La falla tiene una traza de unos 5 kilómetros dentro del área de estudio, sin embargo, en total se estima que tiene una longitud de 11 kilómetros desde la mina Delirio hacia el noreste (Adriasola, 1997).

Falla El Culen

Estructura con orientación NE, ubicada al NW de la zona de estudio, que pone en contacto a rocas del Plutón Punitaqui con rocas del Complejo Hipabisal El Pidén, afectando tanto de forma frágil como dúctil (Ormeño *et al.*, 2011).

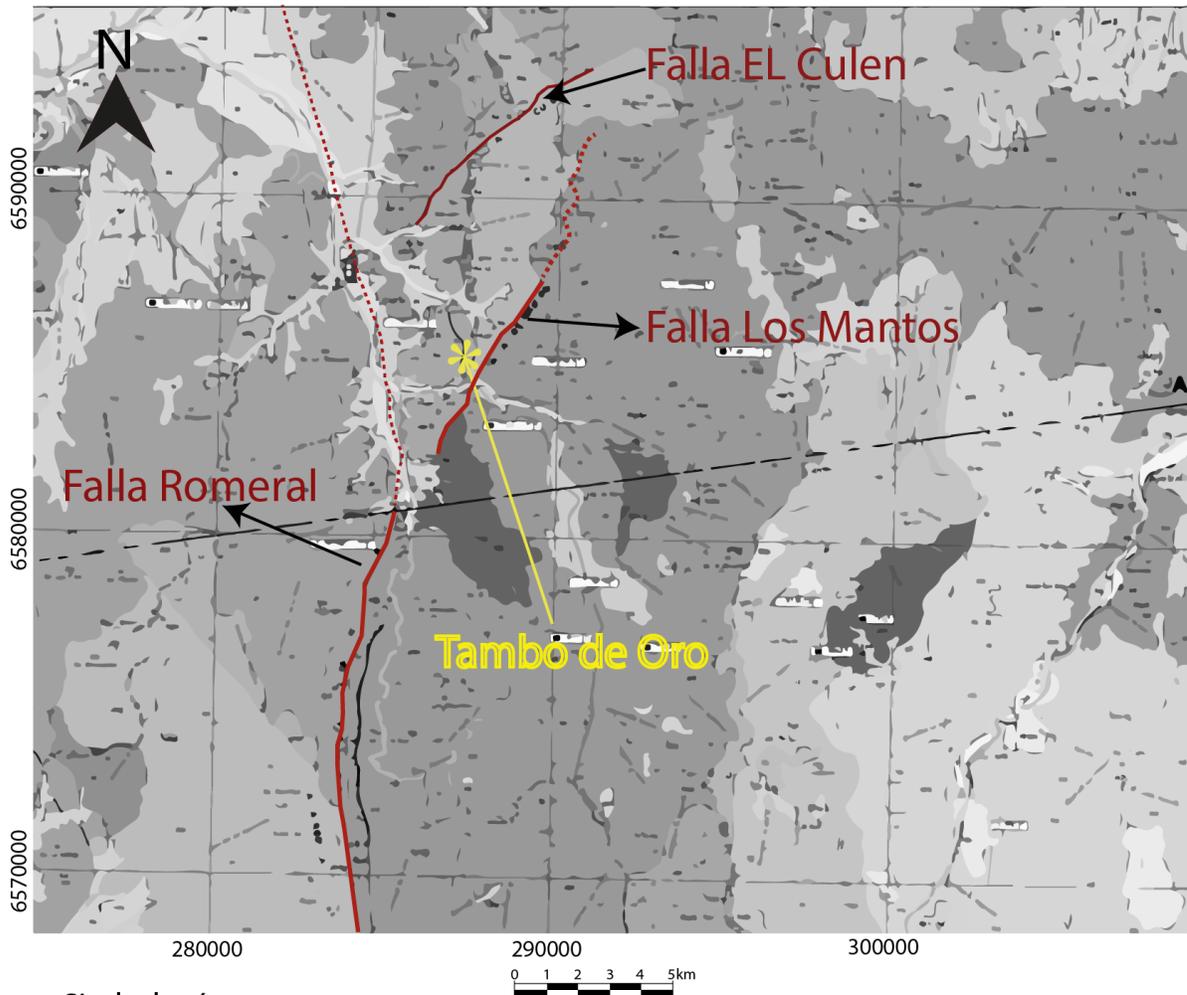


Figura 2.2: Mapa regional con las estructuras principales de la zona de estudio.

2.2 Geología del depósito Tambo de Oro

El depósito Tambo de Oro se ubica en la parte más oriental de la franja de depósitos de tipo IOCG en Chile (Sillitoe, 2003), específicamente en la franja metalogénica del Cretácico temprano (Maksaev *et al.*, 2007). La zona se encuentra alineada con yacimientos de tipo magnetita-apatito (Romeral) (Ruiz *et al.*, 1965), pórfido cuprífero (Andacollo) (Camus, 2003), Skarn (Panulcillo) (Ardila, 1993) y una serie de depósitos vetiformes de oro y cobre (Ormeño *et al.*, 2011). El yacimiento se caracteriza por estar localizado en la Formación Arqueros al este de la falla Romeral, limitado al noroeste por la falla El Culen y el Plutón Punitaqui datado en 122 Ma (Ormeño *et al.*, 2011) y al sureste por la falla Los Mantos y el Plutón del Este datado en 111 Ma (Ormeño *et al.*, 2011).

De acuerdo con el procedimiento de mapeo geológico generado el año 2016, se cuenta con 17 unidades litológicas principales, 10 de ellas se agrupan de acuerdo a su origen y 7 corresponden a unidades que controlan la mineralización en el depósito.

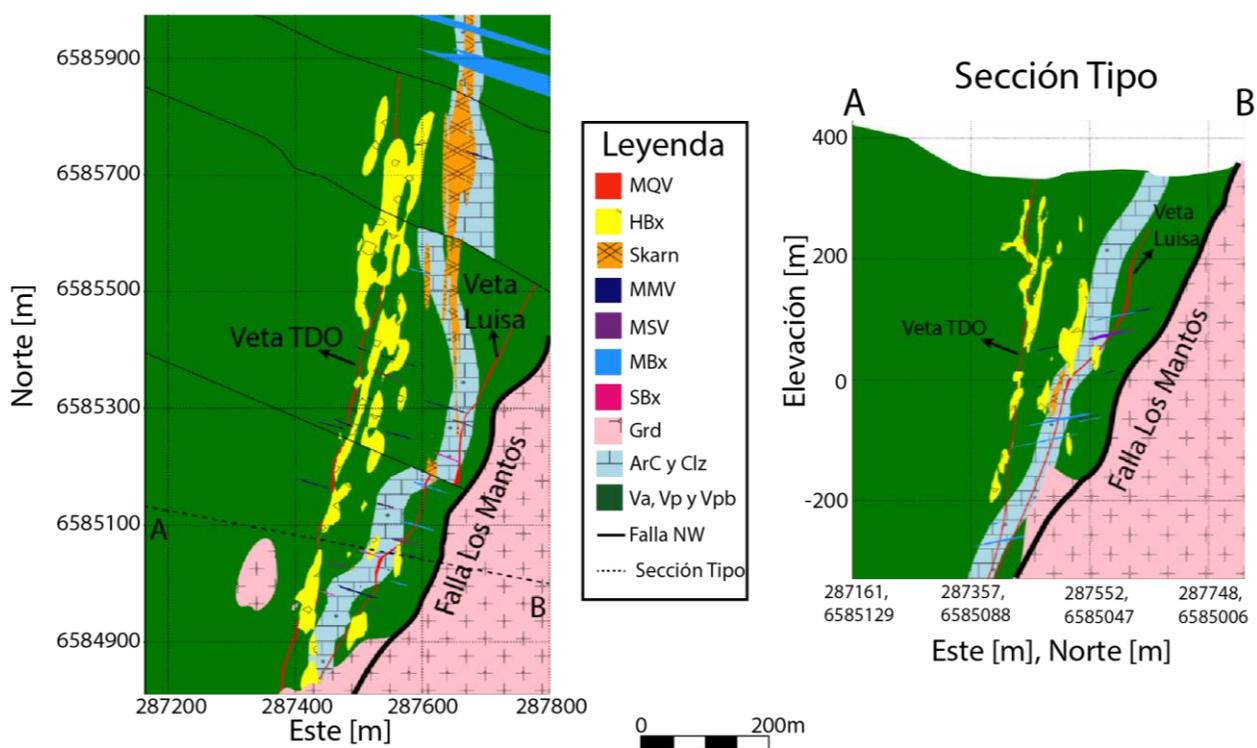


Figura 2.3: Planta y sección tipo del modelo simplificado de Tambo de Oro.

2.2.1 Rocas volcánicas

Las rocas volcánicas descritas para Tambo de Oro corresponden a andesitas con variaciones texturales, las que de acuerdo a la presencia y tamaño de sus fenocristales se clasifican como:

Andesita afanítica, Va

Esta unidad se asocia a la unidad distrital Kihep(a) descrita por Ormeño *et al.*, 2011. El tamaño de los fenocristales de plagioclasas no supera los 2 mm.

Andesita porfírica/porfídica, Vp

Esta unidad corresponde a la unidad distrital Kihep(c) descrita por Ormeño *et al.*, 2011. Presenta fenocristales de plagioclasa de tamaño menor a 4 mm.

Andesita porfidoblástica, Vpb

Esta unidad está asociada a la unidad distrital Kihep(b) descrita por Ormeño *et al.*, 2011. Presenta fenocristales de plagioclasa de tamaño que varía de 2 a 10 mm, llamándose textura “ocoítica”.

2.2.2 Rocas intrusivas

Granodiorita, Grd

Esta unidad corresponde al Plutón del Este descrito por Ormeño *et al.*, 2011 y su emplazamiento está relacionado a la falla Los Mantos. Se ubica al sureste de la zona de estudio en superficie y en profundidad se presenta más hacia el oeste. Además existe una transición entre las rocas volcánicas y este cuerpo intrusivo, evidenciado por pequeños diques de la misma composición que el Plutón.

2.2.3 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias descritas en Tambo de Oro corresponden a las intercalaciones marinas presentes en la formación Arqueros y descritas también por Ormeño *et al.*, 2011 como Zona de Calizas y Skarn ZCS. Estas se clasifican como:

Arenisca calcárea, ArC

Roca detrítica formada por granos de tamaño arena y composición calcárea. Suele presentar evidencias de estratificación en su textura y variaciones en sus coloraciones, lo que facilita su reconocimiento.

Caliza, Clz

Roca calcárea de textura detrítica o cristalina y coloraciones blanquecinas a grisáceas. Se presentan frescas como también con grados variables de skarnificación, lo que es reconocido por la presencia de granate y epidota en ésta. Pueden presentar pirita diseminada e incluso mineralización de oro en algunos casos.

2.2.4 Mineralización

Dentro del yacimiento existen 7 unidades litológicas portadoras de la mineralización de oro y cobre.

Vetas masivas de cuarzo, MQV

Vetas compuestas principalmente por cuarzo blanco y gris, de grano grueso y con presencia de sulfuros de 1 a 2 cm de largo. Los sulfuros presentes son pirita cristalina masiva, conteniendo valores altos de oro, calcopirita y ocasionalmente molibdenita. Esta última ha sido datada mediante el sistema de Re-Os, entregando una edad de mineralización de 108 Ma (Ormeño *et al*, 2011). Por lo general estas vetas presentan una potencia cercana a 1 metro y corridas superior a 1 kilómetro.

Esta unidad se divide en dos vetas principales dentro del depósito, una con rumbo NS y manteo sub vertical hacia el oeste, incluida en la zona de la brecha hidrotermal (HBx), que en este estudio será llamada Veta TDO, mientras que la segunda estructura principal reconocida como veta masiva de cuarzo se encuentra al lado más oriental del depósito, con rumbo N20°E y manteo aproximado de 60° al oeste, la cual adquiere el nombre de Veta Luisa (Figura 2.2).

Debido al estilo de mineralización presente en estas vetas y a la distribución local dentro del yacimiento, se sugiere que existe una transición entre éstas y las vetas de magnetita y especularita descritas más adelante (Sillitoe, 2013).



Figura 2.4: Veta masiva de cuarzo-pirita-calcopirita, MQV.

Brecha hidrotermal, HBx

Brecha hidrotermal formada principalmente por proporciones variables de clastos volcánicos andesíticos, fragmentos de cuarzo, matriz tamaño arena calcárea y cemento de calcita. Puede contener pirita y calcopirita diseminada en la matriz y en los fragmentos. Por lo general esta litología se asocia a mineralización cuando contiene fragmentos de veta de cuarzo (MQV).

Esta unidad sigue una orientación NS, alcanzando hasta 1 kilómetro de largo y unos 500 metros de profundidad. El ancho de la brecha hidrotermal en su mayoría está acotado entre las coordenadas 287400 E y 287600 E (Figura 2.2).

Dentro del depósito Tambo de Oro, se mapea como HBx a toda litología asociada a brechización, incluyendo tanto a los cuerpos mineralizados como a los no mineralizados, dejando como observación si existe o no presencia de clastos de MQV.

Los estudios previos sugieren que hay varias generaciones de desarrollo de brechas tectónicas-hidrotermales, y una distribución de mineralización aparentemente asociada a una o más brechas específicas, siendo las brechas tardías las más productivas. Además, observaciones en sondajes indican que las estructuras hospedajes de mineralización de Au-Cu consiste en relleno de fallas distritales de orientación NS y manteos subverticales (Chávez, 2013).

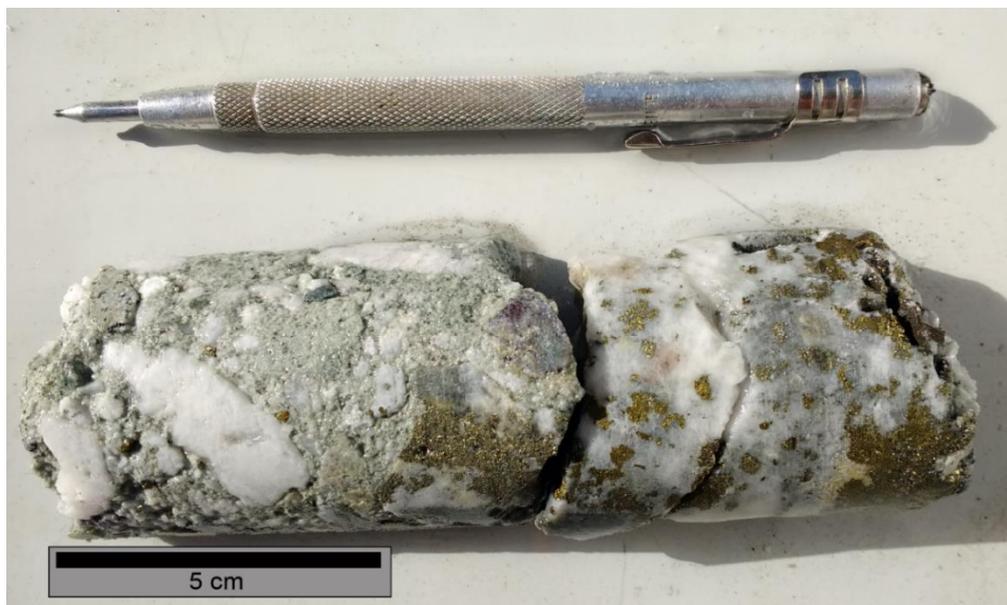


Figura 2.5: Brecha hidrotermal, HBx.

Skarn, Skn

Rocas calcáreas, pertenecientes a la franja sedimentaria marina de la formación Arqueros, afectadas por metasomatismo, con una asociación de granate, sílice, magnetita, epidota y clorita. Esta unidad se encuentra mineralizada con sulfuros dominados por calcopirita y menor presencia de pirita.

La secuencia paragenética del desarrollo de silicatos y sulfuros en las zonas de skarn es siempre local y no se observa presencia de piroxenos o anfíboles. El reemplazo por lo general es macizo, con pocas estructuras de alteración-mineralización (Chávez, 2013).

Observaciones en superficie indican que estas rocas son de color verdoso, con una granulometría que se asemeja a una arenisca. Además, contienen epidota, calcita y escasos granates, sin relictos de la roca original, localmente bandeados, recristalizados por actinolita, tremolita, calcita, titanita y escaso cuarzo. Las bandas reconocidas son ricas en granate de variedad andradita, grossularia o almandino, así como también ricas en epidota y diópsido (Ormeño *et al.*, 2011).



Figura 2.6: Skarn, Skn.

Veta masiva de magnetita, MMV

Vetas compuestas principalmente por magnetita y menor cuarzo, con valores económicos de oro y cobre. Presenta mineralización de pirita, calcopirita y otros sulfuros en menor cantidad. Una variante de estas vetas además incluye granate y puede tener halos de epidota difusa (Sillitoe, 2015). Estas vetas están asociadas con estructuras de rumbo NW presentes en la zona de estudio (Ormeño *et al.* 2011).



Figura 2.7: Veta masiva de magnetita, MMV.

Veta masiva de specularita, MSV

Veta compuesta principalmente por specularita y menor cantidad de cuarzo, conteniendo valores económicos de oro y cobre. Presenta mineralización de pirita y calcopirita diseminada. Al igual que la unidad MMV, estas vetas están asociadas con estructuras de rumbo NW, presentando variaciones de hematita y mushketovita.



Figura 2.8: Veta masiva de specularita, MSV.

Brecha con matriz de magnetita, MBx

Brecha con magnetita como componente principal, usualmente con más de una 10% de Fe. Puede contener matriz calcárea, pirita-calcopirita diseminada, granate en cúmulos especularita-hematita, entre otros. Esta unidad corresponde a una brecha hidrotermal afectada por estructuras de rumbo NW ricas en óxidos de hierro que alteran la matriz o también se asocian a una brechización causada por una veta de magnetita masiva (MMV).



Figura 2.9: Brecha con matriz de magnetita, MBx.

Brecha con matriz de especularita, SBx

Brecha con especularita como componente principal, con mushketovita y cuarzo. Presenta mineralización de pirita y calcopirita que varían entre un 1 % hasta 10 % del total de la roca. El porcentaje de especularita en la matriz puede variar entre 10 a 30 %. Esta unidad puede estar asociada a la brechización provocada por las vetas de especularita masiva (MSV), así como también al reemplazo de la matriz fina de la brecha hidrotermal HBx al ser cortada por una estructura de rumbo NW.



Figura 2.10: Brecha con matriz de especularita, SBx.

2.2.5 Estructuras

Fallas NS

Fallas normales de rumbo NS y manteo al oeste, con trazas no superiores a 1 km y ancho 5 m, que cortan principalmente a rocas del Complejo Hipabisal El Piden (Ormeño *et al.*, 2011). Corresponden a estructuras tensionales que controlan la distribución de la mineralización en algunos yacimientos, incluido Tambo de Oro (Caddey y Brockway, 1998).

Estudios anteriores asocian estas fallas al sistema mineralizado principal desarrollado durante una fase de deformación frágil contemporánea con el proceso de acortamiento NS submeridiano y extensión EW, siendo la Falla Los Mantos, de orientación NE-SW y cinemática de tipo sinistral, la estructura maestra (González, 2014).

Fallas NW

Fallas de componente normal y localmente inversas, con rumbo variable de N30W – N75W y manteos que varían entre los 35° y 80° preferentemente al SW, que afectan indistintamente a todas las unidades litológicas del área de estudio. Estas estructuras están asociadas a mineralización de magnetita y/ hematita especular – óxidos de Cu. Sólo al noreste de la zona de estudio se asocian a mineralización de Au y muy localmente estas fallas se asocian a vetas de cuarzo, parcialmente oqueroso acompañado de especularita (Ormeño *et al.*, 2011).

En el sector sur de Tambo de Oro, estas estructuras están regularmente espaciadas y algunas de ellas contienen vetas delgadas con mineralización de Au – Cu y localmente de Hg, formando enjambres de vetas de importancia económica (Caddey y Brockway, 1998).

3 Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, el trabajo se dividió en tres etapas. La primera consistió en generar una base de datos homogénea a partir de la información entregada por la empresa HMC Gold, así como también de los datos geoquímicos obtenidos durante esta investigación. La segunda etapa se enfocó en determinar la ocurrencia de mercurio en el depósito Tambo de Oro mediante un análisis geoquímico en detalle de las unidades que controlan la mineralización en el depósito, sumado a un estudio calcográfico de muestras de sondajes y un estudio de concentrados de la planta. La última etapa se desarrolló utilizando el software Leapfrog Geo (v.4.1.2) para determinar la distribución espacial del elemento, así como también de los minerales que lo alojan.

3.1 Base de datos

En el distrito minero Punitaqui existen 2 programas de sondajes, uno enfocado a la exploración y el otro a la producción. Los sondajes de exploración son de tipo diamantina de diámetro HQ y se realizan sobre una malla aproximada de 60x50 metros, mientras que los sondajes de producción son de diamantina de diámetro BQ y se reducen a una malla de 30x15 metros. La empresa cuenta a la fecha de este estudio, con 237 sondajes de exploración y 379 sondajes de producción, sumando un total de 94574,5 metros perforados entre los dos programas hasta Julio de 2017.

Todos los sondajes son mapeados y luego muestreados cada 1 metro para ser enviados a analizar mediante diferentes métodos. En total, se tienen 57682 muestras de sondajes provenientes de ambos programas, sin embargo, en este estudio se utilizaron sólo los tramos que tuvieran análisis químico ME-ICP41 y Au-AA23 del laboratorio ALS, en conjunto, quedando una total de 14515 muestras.

El método analítico ME-ICP41 incluye una digestión de agua regia en un bloque calefactor de grafito, obteniendo una solución que se diluye con agua desionizada, para luego ser analizada por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente. Este método incluye 35 elementos, sin embargo, en este estudio se utilizaron sólo algunos de éstos mediante una selección explicada más adelante. Cabe destacar que, para el Cu se incluye el método Cu-OG46 (espectrometría de absorción atómica) en caso de que la concentración presente en la muestra supere el límite superior del análisis ICP.

El método analítico Au-AA23 incluye un ensaye al fuego, que consiste en producir una fusión de la muestra usando reactivos y fundentes adecuados para obtener una escoria de silicatos complejos y una fase metálica (copela) constituida por plomo que colecta los metales de interés, en este caso el Au. Luego la fase metálica es enviada a espectroscopia de absorción atómica.

Los límites de detección de los métodos mencionados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3.1: Límites de detección del método analítico ME-ICP41 (Cu corresponde a Cu-OG46) y Au-AA23 (en azul).

Elemento	Límite Inferior	Límite Superior	Elemento	Límite Inferior	Límite Superior
Ag ppm	0,2	100	Mn ppm	5	50000
Al %	0,01	25	Mo ppm	1	10000
As ppm	2	10000	Na %	0,01	10
B ppm	10	10000	Ni ppm	1	1000
Ba ppm	10	10000	P ppm	10	1000
Be ppm	0,5	1000	Pb ppm	2	1000
Bi ppm	2	10000	S %	0,01	10
Ca %	0,01	25	Sb ppm	2	1000
Cd ppm	0,5	1000	Sc ppm	1	1000
Co ppm	1	10000	Sr ppm	1	1000
Cr ppm	1	10000	Th ppm	20	1000
Cu %	0,001	40	Ti %	0,01	10
Fe %	0,01	50	Tl ppm	10	1000
Ga ppm	10	10000	U ppm	10	1000
Hg ppm	1	10000	V ppm	1	1000
K %	0,01	10	W ppm	10	1000
La ppm	10	10000	Zn ppm	2	1000
Mg %	0,01	25	Au ppm	0,01	

A partir de la Tabla 3.1 se determinaron los elementos que contienen más del 50% de sus valores bajo el límite de detección inferior.

La selección de los elementos para este estudio y la generación de la base de datos que llamaremos base ICP se realizó de acuerdo a dos criterios, el primero consistió en considerar aquellos que presentaran concentraciones anómalas con respecto a la corteza terrestre. El segundo criterio fue incluir los elementos que se alojaran en las especies mineralógicas portadoras de mercurio que hayan sido descritas dentro del depósito o en estudios cercanos a la zona.

Cabe destacar que la base ICP, además de incluir los elementos seleccionados, incluye la litología asociada.

3.1.1 Robustecimiento de datos

El telurio es un elemento muy importante para este estudio debido a su ocurrencia en la coloradoita (HgTe) y calaverita (AuTe₂), ambas especies reportadas en un informe interno de la empresa el año 2015 (Documento Interno, 2015). Dado que en la base ICP no está incluido este elemento, se seleccionaron 136 pulpas de muestras de las 7 unidades mineralizadas, distribuidas por todo el depósito y con concentraciones variadas de mercurio, para ser enviadas a análisis de digestión de cuatro ácidos ME-MS61 del laboratorio ALS. Este método tiene límites de detección de 0.05 y 500 ppm para el telurio.

Para integrar el elemento a la base ICP, se verificó la calidad de la información, comparando los resultados de ambos métodos analíticos. Se obtuvo un coeficiente de correlación para cada elemento y luego con el promedio de éstos se obtuvo uno general. La representación gráfica de estos resultados se realizó con el programa Excel 2013.

3.1.2 Coordenadas

Las muestras de la base de datos se encuentran en formato de tramos de sondaje “Desde-Hasta”. Para obtener las coordenadas espaciales de cada tramo, la información se ingresó al programa Leapfrog Geo (v.4.1.2) para posteriormente generar las coordenadas intermedias de cada muestra mediante la herramienta *Create Mid Points*. Luego se exportaron las tablas de datos en formato Excel. Las coordenadas generadas están en la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) PSAD 56 Zona 19 Sur.

3.2 Estudio geoquímico

Con el fin de conocer las especies mineralógicas en las que se encuentra el mercurio y determinar el o los eventos a los cuales está asociado, se realizó un análisis estadístico geoquímico a partir de la base ICP generada. Primero se evaluaron las estadísticas univariadas de Hg junto al resto de los elementos de interés. El segundo apartado corresponde a las estadísticas multivariadas, con énfasis en las 7 unidades mineralizadas.

3.2.1 Análisis univariable

En esta sección se trabajaron las estadísticas univariadas del mercurio, utilizando el programa ioGAS (v.6.2.1) y Excel 2013, mediante un filtrado de valores anómalos y la generación de gráficos de frecuencia acumulada y probabilidad normal. Luego se evaluaron las estadísticas en las 7 unidades mineralizadas por separado, generando los respectivos diagramas de caja. Por último, se trabajaron las estadísticas del resto de los elementos de interés.

3.2.2 Análisis multivariable

Para llevar a cabo el análisis multivariable de elementos de interés se trabajó con las 7 unidades mineralizadas por separado. Mediante la herramienta *Display Correlation Matrix* del programa ioGAS (v.6.2.1) se obtuvo el coeficiente de Pearson. El coeficiente de correlación de Pearson se ve abruptamente afectado por la presencia de valores anómalos, por lo que se aplica una transformación logarítmica de los datos para hacer que éstos sigan más de cerca una distribución normal bivariada.

Una vez obtenidos los coeficientes de correlación de todos los elementos seleccionados, se procede a destacar por rangos los valores para entregar una mejor visualización de éstos. A las tablas de correlación de cada unidad se le agregó el valor mínimo, máximo y promedio de cada elemento.

Además, se realizó una evaluación de las unidades que incluyen óxidos de hierro, para así determinar si existe tanto una zonación como una correlación espacial entre éstas.

3.3 Estudio calcográfico

Se seleccionaron 6 cortes pulidos pertenecientes a la empresa HMC Gold, descritos y analizados, con microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido (SEM), por Paula Cornejo (en edición). Estos cortes fueron descritos y analizados con el microscopio óptico de la sala M2 del departamento de Geología de la Universidad de Chile.

El estudio se enfocó en determinar la secuencia paragenética de los minerales portadores de mercurio, apoyándose con la información de los espectros obtenidos en el análisis SEM.

La diferencia óptica entre los minerales portadores de mercurio presentes en el depósito (serie de la tetraedrita – tenantita y coloradoita) es mínima, sin embargo, existen algunas diferencias que permiten distinguir cada uno (Anexo 8.2).

3.4 Estudio de concentrado de planta

En este apartado se seleccionaron 3 muestras de material concentrado en planta para ser enviados a análisis químico ME-MS61 en el laboratorio ALS y para confeccionar briquetas pulidas a partir de éste en el laboratorio de Geomaq Ltda. Las briquetas fueron estudiadas en el microscopio óptico del departamento de Geología de la Universidad de Chile.

La selección de las muestras se realizó en base a la concentración de mercurio y oro obtenida en planta. La primera muestra corresponde a valores altos de ambos elementos, la segunda a valores bajos de ambos elementos y la última a una concentración alta de oro y baja de mercurio.

La idea inicial era seleccionar 4 muestras representativas, variando las concentraciones de mercurio y oro, pero dado que durante el período de selección no se obtuvieron altas concentraciones de mercurio junto a bajas concentraciones de oro en la planta, no se logró obtener una cuarta muestra.

3.5 Distribución

Para llevar a cabo el estudio de la distribución de mercurio en el depósito Tambo de Oro se utilizó el programa Leapfrog Geo (v.4.1.2) En primer lugar se creó un modelo 3D de las unidades a partir de la litología incluida en la base ICP y las superficies de un modelo generado por la empresa HMC Gold el año 2016, para luego determinar cómo se distribuye el contaminante junto con otros elementos asociados a las especies minerales portadoras de mercurio observadas en los capítulos de estudio calcográfico y de concentrado, tal como el antimonio y el telurio.

En total se modelaron 7 unidades, de las cuales 4 corresponden a unidades que controlan la mineralización (HBx, MQV, Skarn, Ox Fe), mientras que las otras 3 corresponden a unidades estériles (Volcánico, Sedimentario, Granodiorita). Una vez creados los sólidos de las unidades, se generaron interpolaciones de Hg, Sb y Te con leyes críticas indicadas más adelante en el capítulo 4.5, para luego determinar las zonas en donde se interceptan.

4 Resultados

4.1 Base de datos

La base de datos utilizada en este estudio proviene de dos programas de sondajes, uno enfocado a la exploración y otro a la producción.

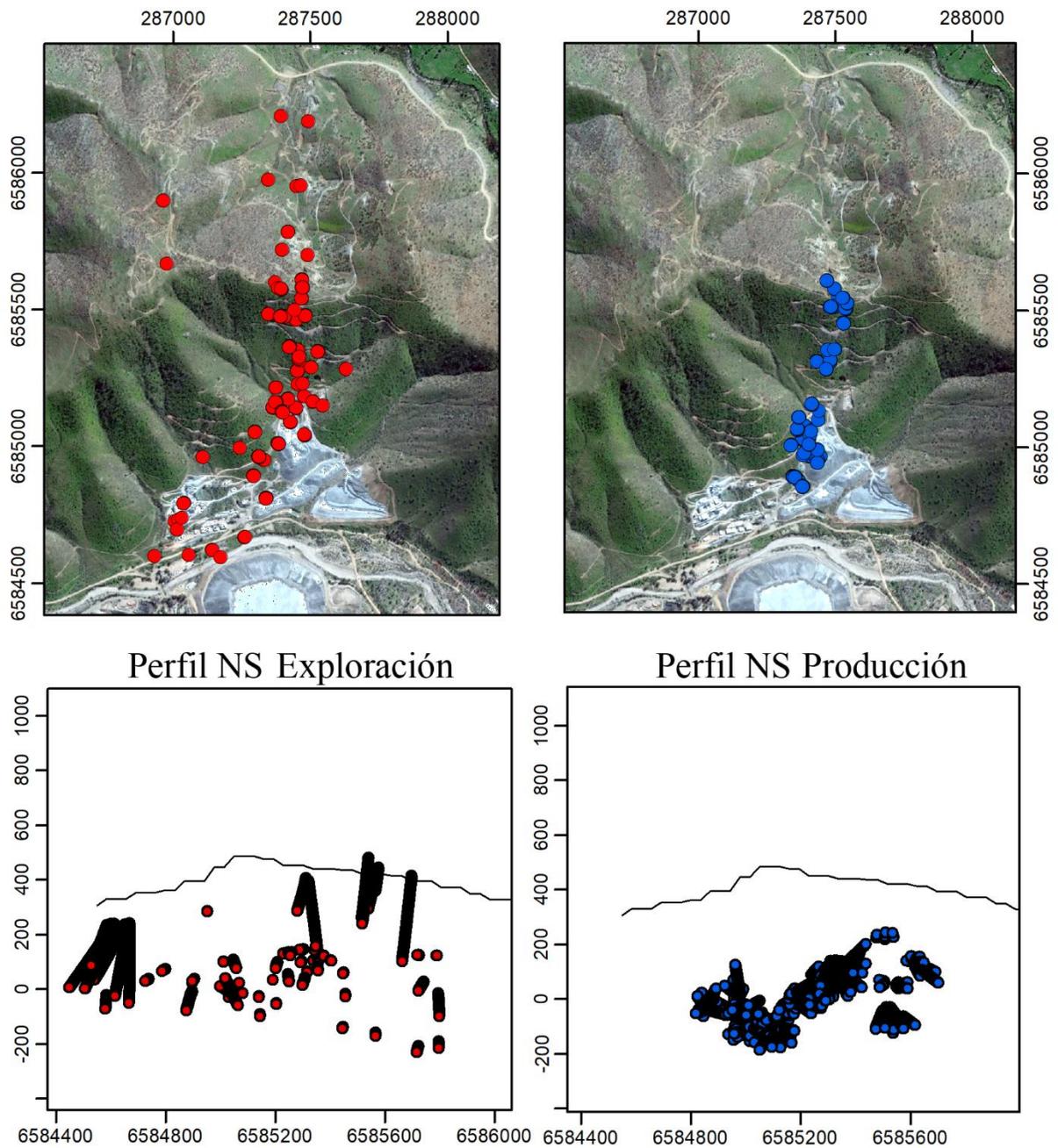


Figura 4.1: Distribución de las muestras de sondajes de Exploración (rojo) y Producción (azul). En planta se presentan sólo los collares de las perforaciones, mientras que en perfil se destacan todas las muestras.

La distribución de los collares de ambos programas de sondajes es similar, diferenciándose levemente en que los de exploración tienen un mayor alcance hacia el norte, noroeste y hacia el suroeste, mientras que los collares de Producción se ubican en el centro. Por otro lado, se observa que las muestras de sondajes de exploración abarcan desde superficie (cota 450 m s. n. m.) hasta la cota -220 m s. n. m., mientras que las muestras de sondajes de producción se ubican entre las cotas 200 y -200 m s. n. m. (Figura 4.1).

Las muestras de sondaje seleccionadas que contienen análisis químico ME-ICP41 y Au-AA23 incluyen un total de 36 elementos, de los cuales 11 resultaron tener más del 50 % de sus valores bajo el límite de detección (Tabla 4.1)

Elemento	%	Elemento	%	Elemento	%
Au	14,8	Cu	0,8	Pb	50,2
Ag	68,8	Fe	0,0	S	5,9
Al	0,0	Ga	36,1	Sb	62,9
As	25,5	Hg	43,8	Sc	0,2
B	77,6	K	0,9	Sr	0,0
Ba	6,9	La	27,5	Th	99,7
Be	88,9	Mg	0,0	Ti	9,2
Bi	75,0	Mn	0,0	Tl	98,4
Ca	0,0	Mo	15,9	U	98,6
Cd	90,7	Na	2,1	V	0,0
Co	0,1	Ni	0,5	W	93,7
Cr	0,4	P	0,0	Zn	0,1

El Hg tiene un 43 % de sus valores bajo el límite de detección, los elementos Ag, Pb y Sb presentan un poco más de la mitad de sus valores bajo el límite, mientras que el B, Be, Bi, Cd, Th, Tl, U y W contienen casi todos sus valores (más del 75 %) inciertos (Tabla 4.1)

En la Figura 4.2 se muestran los elementos anómalos dentro del depósito. Esto se obtiene comparando los promedios de cada elemento en Tambo de Oro con los promedios de la corteza terrestre (Clarke y Washington, 1924; Taylor, 1964), para luego transformar logarítmicamente la razón entre estos dos promedios. Los elementos de mayor abundancia relativa son el Au, Sb, Cu, S, Tl y Bi.

La selección de los elementos para esta investigación se basó principalmente en dos criterios, aquellos con mayor concentración anómala dentro del depósito (Figura 4.2) y aquellos alojados en las posibles especies mineralógicas portadoras de mercurio detectadas en el depósito en estudios anteriores, tales como la serie de la tetradrita-tennantita, coloradoita y cinabrio (Collao, 2006) (Cornejo, en edición) (Documento Interno, 2015).

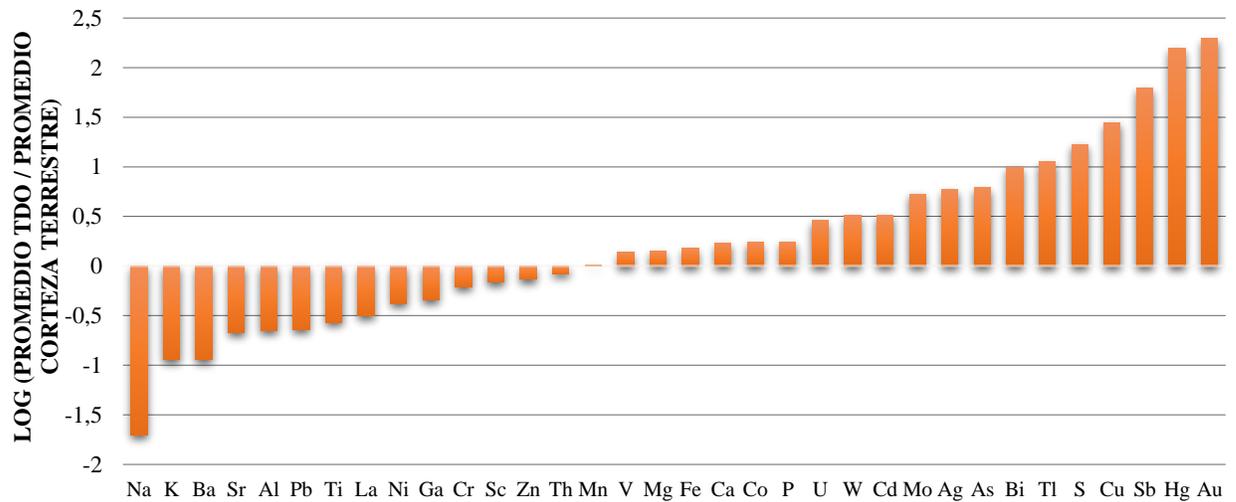


Figura 4.2: Elementos anómalos en Tambo de Oro con respecto a la corteza terrestre.

La plata y el antimonio se consideran importante para este estudio a pesar de tener más del 50 % de sus valores bajo el límite de detección (Tabla 4.1). El cobalto también se considera importante para el estudio debido a la sustitución que puede establecer en la estructura de la pirita (Carballo, 1979), a pesar de no presentar concentraciones anómalas en el depósito (Figura 4.2).

Los elementos seleccionados, en base a los criterios expuestos y a la mineralogía presente en el depósito, son Ag, As, Au, Co, Hg, Sb y Zn en partes por millón (ppm) y Cu, Fe y S en porcentaje (%). Estos 10 fueron corregidos, truncando los valores bajo el límite de detección a la mitad y manteniendo fijo los valores sobre el límite de detección superior.

4.1.1 Robustecimiento de datos

Se compararon las muestras analizadas con los dos métodos (ME-ICP41 y ME-MS61) mediante una regresión lineal entre los valores de los elementos involucrados en este estudio.

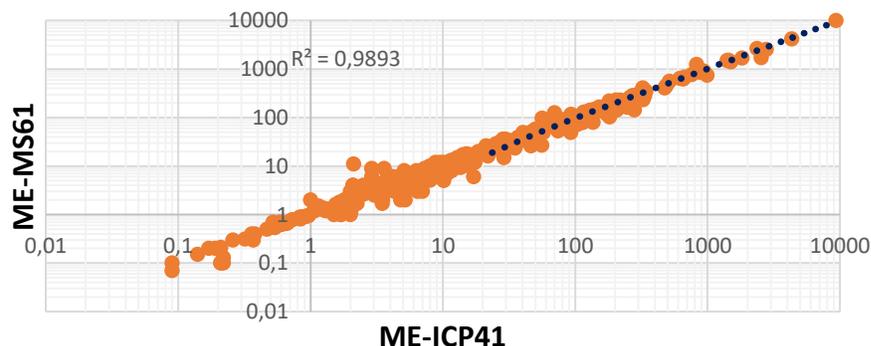


Figura 4.3: Regresión lineal entre la información entregada por el método analítico ME-ICP41 y ME-MS61.

El coeficiente de determinación obtenido entre las dos bases de datos es 0,98 (Figura 4.3), por lo tanto, es posible integrar la información del elemento telurio a la base de datos ICP.

4.2 Estudio geoquímico

4.2.1 Análisis univariable

Las concentraciones de mercurio en la base ICP fluctúan entre 0,5 y 10000 ppm, sin embargo, en este apartado se eliminaron 16 valores atípicos (outliers), quedando un total de 14499 muestras y un valor máximo de 1120 ppm. La distribución del elemento se asemeja a una distribución log-normal, sin embargo, debido a su alto límite de detección inferior, se observa una distribución exponencial, con una alta concentración (42 %) de valores igual al mínimo (0,5 ppm) (Figura 4.4A).

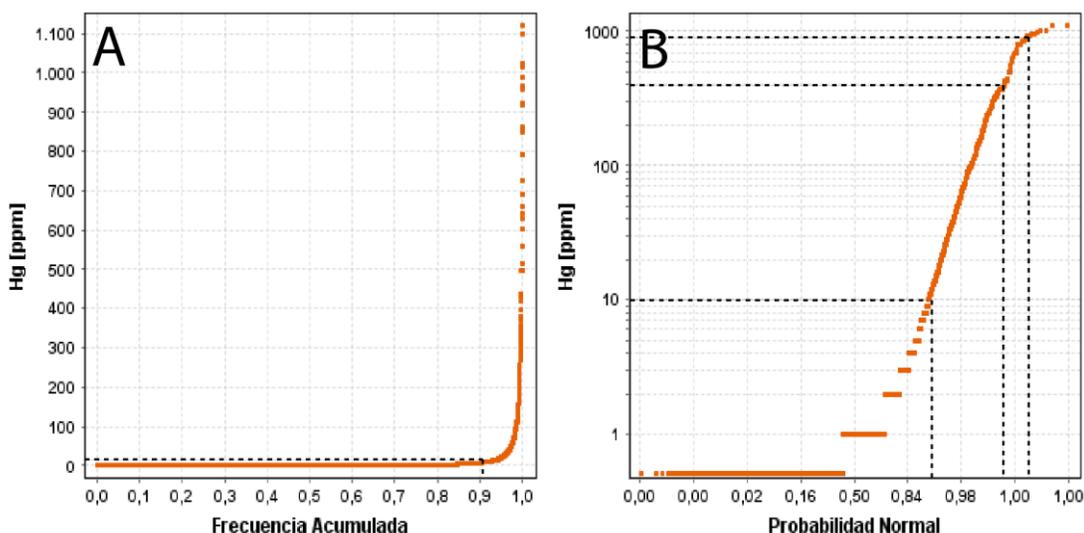


Figura 4.4: Gráficos de estadísticas univariadas de Hg. La línea discontinua representa la división de las poblaciones de datos. A) gráfico de frecuencia acumulada. B) gráfico de probabilidad normal.

En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar la tendencia que tienen los valores más bajos del elemento y que a partir del percentil 80 comienza un aumento exponencial de las leyes de mercurio, alcanzando hasta 2 órdenes de magnitud superior a la media (Figura 4.4A). En el gráfico de probabilidad normal, se logran distinguir más de 3 poblaciones de datos. En primer lugar, se destaca la población de valores mínimos iguales a 0,5 ppm, después se observa un quiebre en la pendiente a los 10 ppm, luego está la población de los valores entre 10 y 400 ppm, y por último las concentraciones más altas con un comportamiento distinto (Figura 4.4B).

Tabla 4.2: Estadísticas de Hg en Tambo de Oro.	
Hg [ppm]	
Cuenta	14499
Mínimo	0,5
Máximo	1120
Promedio	7,529
Moda	0,5
Desviación Estandar	45,082
Cuartil 1	0,5
Cuartil 2	1
Cuartil 3	2

Más del 90% de los valores de mercurio, es decir más de 13000 datos, se encuentran bajo la media (7,529 ppm) y el 42% de los valores, alrededor de 6.000 datos, es igual al mínimo (0,5 ppm) (Tabla 4.2).

Tabla 4.3: Estadísticas de Hg en las unidades estériles.				
Hg [ppm]	Volcánica	Sedimentaria	Granodiorita	Otras
Interceptos	6889	966	862	801
Min	0,5	0,5	0,5	0,5
Max	923	960	432	862
Promedio	3,74	13,93	5,75	14,11
σ	25,53	62,89	32,98	61,62
Q1	0,5	0,5	0,5	0,5
Q2	1	2	1	1
Q3	1	5	1	3

De los 14499 datos en la base ICP, alrededor del 65 % corresponde a interceptos de unidades estériles y un 35 % a unidades mineralizadas. Dentro de las unidades estériles se incluye la unidad Volcánica, Sedimentaria, Granodiorita y Otras (Fallas, Diques, entre otras) (Tabla 4.3). Estas unidades estériles no tienen mayor relevancia para el desarrollo de esta investigación por el hecho de no ser consideradas para la explotación minera, sin embargo, las estadísticas indican que existe una alta concentración de mercurio, en la unidad Sedimentaria y en el resto de las unidades incluidas en “Otras”.

De los interceptos de unidades mineralizadas, más del 70 % corresponde a brecha hidrotermal (HBx), seguido de la unidad de skarn (Skn) con casi un 10 % y la unidad de veta masiva de cuarzo (MQV) con un 6,5 % de los interceptos. Las concentraciones promedio de mercurio en las 7 unidades varían entre 5 y 35 ppm, siendo la HBx y Skn las con menor valor. Los mayores promedios absolutos de mercurio se encuentran en las unidades MBx, SBx y MQV (Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Estadísticas de Hg en las unidades mineralizadas.							
Hg [ppm]	MQV	HBx	Skn	MMV	MSV	MBx	SBx
Interceptos	327	3662	487	96	148	145	116
Min	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Max	791	1120	991	253	331	1100	661
Promedio	28,59	7,77	5,55	10,88	21,00	34,14	35,46
σ	77,63	51,09	45,73	36,06	55,65	121,87	109,81
Q1	1	0,5	0,5	0,62	1	1	0,5
Q2	2	1	1	1	2	3	1,5
Q3	17	2	3	4	10	10	18,5

Los 2 primeros cuartiles de estas unidades son semejantes y no superan los 3 ppm de mercurio, a diferencia del tercer cuartil, en donde las concentraciones en la MQV, MSV, MBx y SBx se escapan del resto de las unidades. Por otro lado, las mayores desviaciones se observan en las brechas con matriz de óxidos de hierro (MBx y SBx) y en las vetas de cuarzo masivo (MQV).

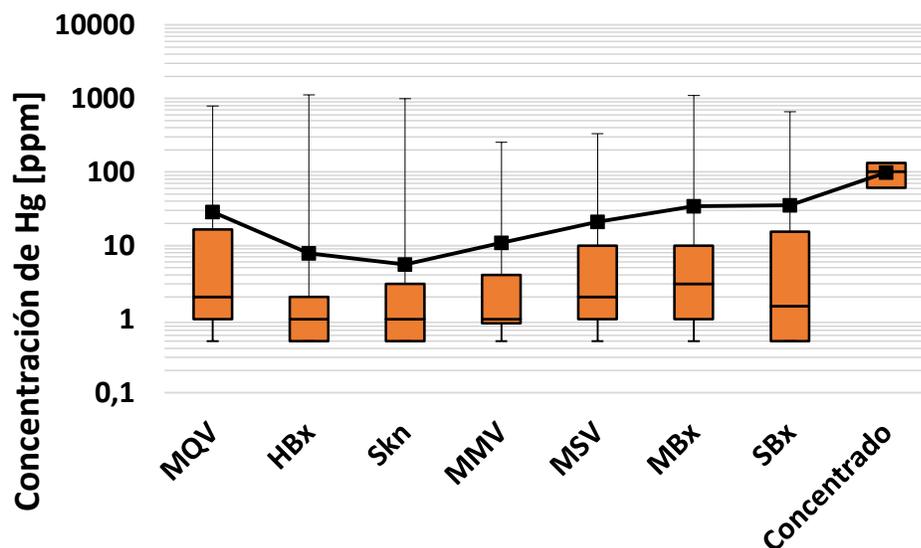


Figura 4.5: Diagramas de caja de Hg en las unidades mineralizadas y en el concentrado extraído de la planta.

Las concentraciones máximas en cada unidad superan por más de 1 orden de magnitud a las concentraciones promedio respectivas, las que a su vez se ubican por encima del tercer cuartil (Tabla 4.4), por ende, fuera del diagrama de caja. De la Figura 4.5 se observa que la unidad MQV sigue el mismo comportamiento que la MSV y MBx, con una leve diferencia en sus valores máximos y promedios.

Tabla 4.5: Estadísticas de los elementos de interés en Tambo de Oro.										
	Ag ppm	As ppm	Sb ppm	Zn ppm	Te ppm	Au ppm	S %	Cu %	Fe %	Co ppm
Min	0,1	1	1	1	0,03	0,0025	0,005	0,001	0,14	0,5
Max	100	7640	4180	10000	332	1250	10	14,56	50	1140
Promedio	0,40	10,71	10,25	50,42	15,45	0,75	0,70	0,10	5,31	20,96
σ	1,70	98,33	93,87	186,10	38,75	11,91	1,31	0,49	3,25	36,24
Cuartil 1	0,1	2	1	17	0,77	0,01	0,05	0,01	3,83	12
Cuartil 2	0,1	3	1	29	2,09	0,03	0,22	0,02	4,8	17
Cuartil 3	0,1	5	3	51	13,19	0,15	0,7	0,06	5,96	22

El comportamiento de As y Sb es similar al comportamiento observado del Hg. Sus desviaciones son altas en comparación a sus promedios y la mayoría de los valores (más del 75%) se ubican bajo éste. Lo mismo ocurre con los elementos Te, Au y Ag, pero en menor proporción. Por otro lado, las concentraciones máximas observados en los elementos Sb, As y Zn alcanzan hasta 3 órdenes de magnitud superior a sus promedios (Tabla 4.5).

4.2.2 Análisis multivariable

Matriz de correlación de Pearson

La matriz de correlación de Pearson es un método de estimación del grado de asociación lineal entre dos variables que utiliza un coeficiente (coeficiente de correlación de Pearson) que corresponde al cociente de la covarianza que hay entre dos variables y el producto de sus respectivas desviaciones estándar.

Dado que las estadísticas univariadas del mercurio indican que el elemento tiene un comportamiento muy variable y presenta un aumento exponencial en sus valores superiores, el análisis de correlación de Pearson entre los elementos de interés se realiza con una transformación logarítmica de los datos para contrarrestar el efecto de los valores superiores y lograr que la distribución de éstos se asemeje más a una distribución normal bivariable.

En las siguientes 7 tablas se destacan algunos rangos de coeficientes de correlación, en morado los valores iguales o sobre 0.8, en rojo los valores entre 0.5 y 0.79 y en naranja los valores entre 0.2 y 0.49. Además, se incluyen los mínimos, máximos y promedios de cada elemento en cada unidad mineralizada.

Tabla 4.6: Coeficientes de correlación de Pearson en Veta masiva de cuarzo.											
<i>MQV</i>	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Ag</i>	1	0,57	0,61	0,66	0,57	-0,37	0,31	0,27	0,38	0,034	0,16
<i>As</i>	0,57	1	0,7	0,76	0,42	-0,27	0,2	0,27	0,25	0,17	0,3
<i>Hg</i>	0,61	0,7	1	0,87	0,45	-0,44	0,14	0,13	0,12	-0,11	0,04
<i>Sb</i>	0,66	0,76	0,87	1	0,52	-0,38	0,079	0,14	0,24	-0,058	0,096
<i>Zn</i>	0,57	0,42	0,45	0,52	1	-0,14	-0,026	0,018	0,093	0,016	0,22
<i>Te</i>	-0,37	-0,27	-0,44	-0,38	-0,14	1	0,87	0,77	-0,17	0,32	0,25
<i>Au</i>	0,31	0,2	0,14	0,079	-0,026	0,87	1	0,7	0,47	0,46	0,15
<i>S</i>	0,27	0,27	0,13	0,14	0,018	0,77	0,7	1	0,51	0,54	0,48
<i>Cu</i>	0,38	0,25	0,12	0,24	0,093	-0,17	0,47	0,51	1	0,45	0,19
<i>Fe</i>	0,034	0,17	-0,11	-0,058	0,016	0,32	0,46	0,54	0,45	1	0,58
<i>Co</i>	0,16	0,3	0,04	0,096	0,22	0,25	0,15	0,48	0,19	0,58	1
	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Min</i>	0,1	1	0,5	1	2	0,09	0,0025	0,005	0,001	0,7	1
<i>Max</i>	100	2250	791	4180	862	44,3	90,1	10	14,56	34,1	1130
<i>Promedio</i>	1,67	36,16	28,59	64,89	30,56	8,64	2,57	2,44	0,81	6,02	36,68

Hay 327 muestras que corresponden a MQV con sulfuros y de éstas, 23 tienen análisis químico de Te. Los coeficientes indican tres grupos principales de elementos, el mercurio junto con el arsénico y antimonio, con una alta correlación entre ellos, indicando una residencia mineral casi idéntica, el oro con el teluro y azufre, también con fuertes coeficientes entre ellos y por último se muestra una correlación entre el azufre con el cobre, hierro y cobalto, lo que se infiere como la ocurrencia de calcopirita y pirita. Las mayores concentraciones absolutas en esta unidad corresponden a los elementos Ag, As, Au, Cu, Hg, S y Sb.

El mercurio presenta correlaciones fuertes con el antimonio, así como también con algunos elementos presentes en la serie de la tetraedrita-tenantita (As, Ag y Zn). El cobre se presenta con correlaciones moderadas con el arsénico, antimonio y plata, y un tanto mayor con el hierro, azufre y el oro. Por su lado, el oro muestra muy buena correlación con el teluro y un tanto menor con los elementos asociados a la pirita y calcopirita. El zinc presenta una correlación moderada con el antimonio, mercurio y arsénico.

Tabla 4.7: Coeficientes de correlación de Pearson en Brecha hidrotermal.											
HBx	Ag	As	Hg	Sb	Zn	Te	Au	S	Cu	Fe	Co
Ag	1	0,37	0,36	0,52	0,031	-0,13	0,35	0,26	0,53	0,028	0,078
As	0,37	1	0,43	0,52	0,003	-0,47	0,11	0,1	0,19	0,032	0,1
Hg	0,36	0,43	1	0,64	-0,095	-0,59	0,3	0,17	0,14	-0,13	-0,11
Sb	0,52	0,52	0,64	1	0,022	-0,57	0,17	0,037	0,19	-0,092	-0,058
Zn	0,031	0,003	-0,095	0,022	1	-0,62	-0,45	-0,43	-0,13	0,11	0,35
Te	-0,13	-0,47	-0,59	-0,57	-0,62	1	0,93	0,74	-0,094	0,47	0,22
Au	0,35	0,11	0,3	0,17	-0,45	0,93	1	0,7	0,41	0,17	-0,011
S	0,26	0,1	0,17	0,037	-0,43	0,74	0,7	1	0,48	0,17	0,14
Cu	0,53	0,19	0,14	0,19	-0,13	-0,094	0,41	0,48	1	0,12	0,18
Fe	0,028	0,032	-0,13	-0,092	0,11	0,47	0,17	0,17	0,12	1	0,56
Co	0,078	0,1	-0,11	-0,058	0,35	0,22	-0,011	0,14	0,18	0,56	1
	Ag	As	Hg	Sb	Zn	Te	Au	S	Cu	Fe	Co
Min	0,1	1	0,5	1	1	0,03	0,0025	0,005	0,001	0,4	0,5
Max	38	7640	1120	2640	795	332	1250	10	9,609	45,1	1140
Promedio	0,45	9,88	7,77	7,56	49,19	30,05	1,61	1,04	0,10	4,95	20,14

Existen 3662 muestras que corresponden a HBx, de las cuales 56 incluyen análisis de Te. A diferencia de la tabla de correlación para la MQV, en ésta los elementos de mayor concentración absoluta son el Au, Te, Pb y S, sin embargo, el único de éstos que supera las concentraciones promedio de la veta de cuarzo masivo es el telurio, con 30,05 ppm, siendo la mayor concentración promedio del elemento entre todas las unidades. La correlación entre el mercurio con el antimonio y el arsénico es más baja que en la unidad MQV, mientras que la correlación entre el telurio y el oro es más alta.

A diferencia de la unidad MQV, en ésta el cobre y el oro no presentan buena correlación con el hierro, así como también el zinc no presenta correlación alguna con los elementos que están asociados a la serie de la tetraedrita, como es el arsénico y el antimonio.

Tabla 4.8: Coeficientes de correlación de Pearson en Skarn.											
<i>Skn</i>	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Ag</i>	1	0,35	0,42	0,46	-0,036	0,22	0,6	0,19	0,53	0,11	0,049
<i>As</i>	0,35	1	0,22	0,28	0,17	-0,15	0,13	-0,049	0,15	0,029	-0,026
<i>Hg</i>	0,42	0,22	1	0,59	0,18	0,68	0,34	-0,11	0,0041	-0,26	-0,25
<i>Sb</i>	0,46	0,28	0,59	1	0,11	0,19	0,3	-0,064	0,2	-0,12	-0,2
<i>Zn</i>	-0,036	0,17	0,18	0,11	1	-0,13	-0,16	-0,24	-0,19	-0,47	-0,24
<i>Te</i>	0,22	-0,15	0,68	0,19	-0,13	1	0,45	0,32	0,19	0,81	0,11
<i>Au</i>	0,6	0,13	0,34	0,3	-0,16	0,45	1	0,26	0,38	0,2	0,084
<i>S</i>	0,19	-0,049	-0,11	-0,064	-0,24	0,32	0,26	1	0,55	0,63	0,85
<i>Cu</i>	0,53	0,15	0,0041	0,2	-0,19	0,19	0,38	0,55	1	0,42	0,44
<i>Fe</i>	0,11	0,029	-0,26	-0,12	-0,47	0,81	0,2	0,63	0,42	1	0,7
<i>Co</i>	0,049	-0,026	-0,25	-0,2	-0,24	0,11	0,084	0,85	0,44	0,7	1
	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Min</i>	0,1	1	0,5	1	1	0,41	0,0025	0,005	0,001	0,72	1
<i>Max</i>	16,4	418	991	401	6310	22	150,5	10	4,38	50	714
<i>Promedio</i>	0,59	30,02	5,55	7,57	103,60	3,90	1,82	1,26	0,18	9,18	42,40

Existen 487 muestras que corresponden a Skarn, de las cuales 10 contienen análisis de Te. Los elementos con mayor concentración absoluta son el As, Au, Zn, Co y en menor medida el S, Cu y Fe. Las concentraciones de mercurio y antimonio en conjunto son las más bajas de las siete unidades mineralizadas al igual que su correlación.

A diferencia de las dos unidades anteriores, en ésta la correlación entre el arsénico y el antimonio es baja y el telurio no presenta una alta afinidad con el oro, pero sí con el mercurio y aún mayor con el hierro. Además, el oro tiene la mejor correlación con la plata, así como también el cobalto con el azufre y hierro.

Tabla 4.9: Coeficientes de correlación de Pearson en Veta masiva de magnetita.											
<i>MMV</i>	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Ag</i>	1	0,49	0,47	0,4	0,36	0,65	0,37	0,3	0,46	0,22	0,35
<i>As</i>	0,49	1	0,48	0,49	0,25	-0,24	0,14	0,34	0,15	0,23	0,25
<i>Hg</i>	0,47	0,48	1	0,78	0,12	-0,4	0,3	0,15	0,11	-0,14	-0,14
<i>Sb</i>	0,4	0,49	0,78	1	0,13	-0,56	0,12	0,054	0,11	-0,089	-0,16
<i>Zn</i>	0,36	0,25	0,12	0,13	1	-0,033	-0,18	-0,071	0,2	0,075	0,17
<i>Te</i>	0,65	-0,24	-0,4	-0,56	-0,033	1	0,88	0,6	0,58	0,37	0,85
<i>Au</i>	0,37	0,14	0,3	0,12	-0,18	0,88	1	0,43	0,43	0,19	0,034
<i>S</i>	0,3	0,34	0,15	0,054	-0,071	0,6	0,43	1	0,47	0,37	0,51
<i>Cu</i>	0,46	0,15	0,11	0,11	0,2	0,58	0,43	0,47	1	0,15	0,3
<i>Fe</i>	0,22	0,23	-0,14	-0,089	0,075	0,37	0,19	0,37	0,15	1	0,53
<i>Co</i>	0,35	0,25	-0,14	-0,16	0,17	0,85	0,034	0,51	0,3	0,53	1
	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Min</i>	0,1	1	0,5	1	2	0,2	0,0025	0,005	0,001	0,91	1
<i>Max</i>	10,6	72	253	410	383	10,15	121	10	8,242	50	631
<i>Promedio</i>	0,79	12,03	10,88	15,44	27,73	2,36	2,65	2,12	0,47	18,55	52,93

Existen 96 muestras correspondientes a MMV, de las cuales 8 contienen análisis químico de Te. Los elementos con mayor promedio en esta litología son el Cu, Au, S, Fe y Co, siendo los dos últimos los con mayor concentración absoluta de las 7 unidades, con 18.55 y 52.93 ppm respectivamente.

Las concentraciones de mercurio, antimonio, arsénico y telurio en esta unidad son bajas, por lo que sus correlaciones indican asociaciones minerales de escasa ocurrencia. Por otro lado, existe una buena correlación de cobalto con azufre y hierro, que, sumado a sus altas concentraciones en la unidad, se asemeja al comportamiento de estos elementos en la unidad de skarn descrita anteriormente.

Tabla 4.10: Coeficientes de correlación de Pearson en Veta masiva de especularita.

<i>MSV</i>	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Ag</i>	1	0,41	0,53	0,51	0,15	-0,34	0,26	0,23	0,48	0,056	0,13
<i>As</i>	0,41	1	0,56	0,61	0,047	-0,0055	0,18	0,0035	0,28	0,17	0,38
<i>Hg</i>	0,53	0,56	1	0,81	0,28	-0,52	0,081	0,18	0,16	-0,11	0,17
<i>Sb</i>	0,51	0,61	0,81	1	0,33	-0,86	-0,028	0,16	0,24	-0,06	0,27
<i>Zn</i>	0,15	0,047	0,28	0,33	1	-0,51	-0,46	-0,26	-0,13	-0,37	0,34
<i>Te</i>	-0,34	-0,0055	-0,52	-0,86	-0,51	1	0,91	0,83	-0,75	0,42	0,55
<i>Au</i>	0,26	0,18	0,081	-0,028	-0,46	0,91	1	0,54	0,37	0,4	0,035
<i>S</i>	0,23	0,0035	0,18	0,16	-0,26	0,83	0,54	1	0,36	0,21	0,26
<i>Cu</i>	0,48	0,28	0,16	0,24	-0,13	-0,75	0,37	0,36	1	0,21	0,17
<i>Fe</i>	0,056	0,17	-0,11	-0,06	-0,37	0,42	0,4	0,21	0,21	1	0,14
<i>Co</i>	0,13	0,38	0,17	0,27	0,34	0,55	0,035	0,26	0,17	0,14	1
	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Hg</i>	<i>Sb</i>	<i>Zn</i>	<i>Te</i>	<i>Au</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
<i>Min</i>	0,1	1	0,5	1	1	0,17	0,005	0,005	0,001	1,31	2
<i>Max</i>	11,9	413	331	510	165	85	58,3	10	9,02	20,6	593
<i>Promedio</i>	0,67	20,11	21,00	27,52	24,14	13,38	1,71	1,65	0,34	8,47	22,03

Existen 148 muestras que corresponden a MSV, de las cuales 9 tienen análisis químico de Te. Los elementos con mayores concentraciones absolutas se asemejan a los de la unidad MQV antes mencionada, con la diferencia que en este caso el mercurio, antimonio, arsénico, zinc, entre otros, presentan promedios más bajos. Por otro lado, la correlación entre los elementos sigue un comportamiento similar al de la unidad MQV, con diferencias en el cobalto, que en este caso no tiene correlación con el hierro, pero sí con el telurio. Además, la correlación entre el hierro con el cobre y azufre es baja, infiriéndose como una menor ocurrencia de calcopirita y pirita, pero mayor de minerales oxidados de hierro (especularita y mushketovita).

A diferencia de la unidad MMV, en ésta se observa un aumento en la concentración de los elementos As, Hg, Sb y Te, y una disminución en la concentración de Fe, Co y S, lo que se infiere como una zonación entre las dos unidades, siendo las vetas de magnetita masiva que varían a vetas de hematita specular en condiciones de menor temperatura.

Tabla 4.11: Coeficientes de correlación de Pearson en Brecha con matriz de magnetita.											
MBx	Ag	As	Hg	Sb	Zn	Te	Au	S	Cu	Fe	Co
Ag	1	0,55	0,46	0,44	0,42	0,23	0,53	0,53	0,75	0,21	0,38
As	0,55	1	0,58	0,57	0,19	-0,098	0,43	0,51	0,41	0,31	0,32
Hg	0,46	0,58	1	0,88	0,15	-0,046	0,095	0,3	0,27	-0,078	-0,066
Sb	0,44	0,57	0,88	1	0,22	-0,16	-0,016	0,19	0,27	-0,1	-0,14
Zn	0,42	0,19	0,15	0,22	1	0,25	-0,16	-0,22	0,16	-0,15	0,03
Te	0,23	-0,098	-0,046	-0,16	0,25	1	0,58	-0,0066	0,19	-0,73	0,28
Au	0,53	0,43	0,095	-0,016	-0,16	0,58	1	0,74	0,59	0,52	0,45
S	0,53	0,51	0,3	0,19	-0,22	-0,0066	0,74	1	0,55	0,55	0,58
Cu	0,75	0,41	0,27	0,27	0,16	0,19	0,59	0,55	1	0,29	0,39
Fe	0,21	0,31	-0,078	-0,1	-0,15	-0,73	0,52	0,55	0,29	1	0,58
Co	0,38	0,32	-0,066	-0,14	0,03	0,28	0,45	0,58	0,39	0,58	1
	Ag	As	Hg	Sb	Zn	Te	Au	S	Cu	Fe	Co
Min	0,1	1	0,5	1	3	0,13	0,0025	0,02	0,001	1,18	3
Max	19,8	207	1100	1260	295	1,78	33	10	2,477	44,5	1140
Promedio	1,33	17,15	34,14	36,92	31,71	0,82	2,47	2,46	0,32	11,69	45,76

Existen 145 interceptos de MBx, de los cuales 9 contienen análisis químico de Te. La correlación entre el mercurio y el antimonio es alta, mientras que con el arsénico es moderadamente alta. A diferencia de la unidad MMV, en esta hay una mayor concentración absoluta de Hg, Sb, As y Ag, y una menor concentración de Co, Fe y Cu, infiriéndose como una posible zonación entre ambas unidades. La concentración de telurio presente en esta unidad (0,82 ppm) es la más baja de las 7 unidades mineralizadas.

Tabla 4.12: Coeficientes de correlación de Pearson en Brecha con matriz de especularita.											
SBx	Ag	As	Hg	Sb	Zn	Te	Au	S	Cu	Fe	Co
Ag	1	0,46	0,7	0,74	0,45	-0,49	0,37	0,44	0,62	0,28	0,36
As	0,46	1	0,73	0,7	0,028	-0,14	0,36	0,36	0,24	0,099	0,29
Hg	0,7	0,73	1	0,91	0,31	-0,49	0,38	0,32	0,29	0,13	0,4
Sb	0,74	0,7	0,91	1	0,41	-0,37	0,24	0,32	0,31	0,18	0,34
Zn	0,45	0,028	0,31	0,41	1	-0,41	-0,078	-0,18	0,13	0,21	0,33
Te	-0,49	-0,14	-0,49	-0,37	-0,41	1	0,85	0,67	-0,65	0,14	0,48
Au	0,37	0,36	0,38	0,24	-0,078	0,85	1	0,67	0,38	0,23	0,36
S	0,44	0,36	0,32	0,32	-0,18	0,67	0,67	1	0,39	0,34	0,37
Cu	0,62	0,24	0,29	0,31	0,13	-0,65	0,38	0,39	1	0,16	0,15
Fe	0,28	0,099	0,13	0,18	0,21	0,14	0,23	0,34	0,16	1	0,37
Co	0,36	0,29	0,4	0,34	0,33	0,48	0,36	0,37	0,15	0,37	1
	Ag	As	Hg	Sb	Zn	Te	Au	S	Cu	Fe	Co
Min	0,1	1	0,5	1	1	0,17	0,005	0,005	0,001	1,46	3
Max	18,6	4510	661	1695	217	6,08	12,75	10	1,569	18,3	81,5
Promedio	0,96	120,12	35,46	53,81	31,21	2,01	0,91	1,67	0,13	6,44	17,61

Existen 116 muestras codificadas como SBx, de las cuales 8 contienen análisis químico de Te. En esta unidad se observa una buena correlación entre los elementos que se alojan en la serie de la tetraedrita-tenantita (As, Sb, Hg) y entre el telurio, oro y azufre. Por otro lado, los elementos con mayor concentración absoluta son el As, Sb, Hg, Ag y S, mientras que las concentraciones de Te son bajas, lo que se infiere como una alta ocurrencia de minerales de la serie de la tetraedrita-tenantita, pero baja de coloradoita.

4.2.3 Correlación entre las unidades de óxidos de Hierro

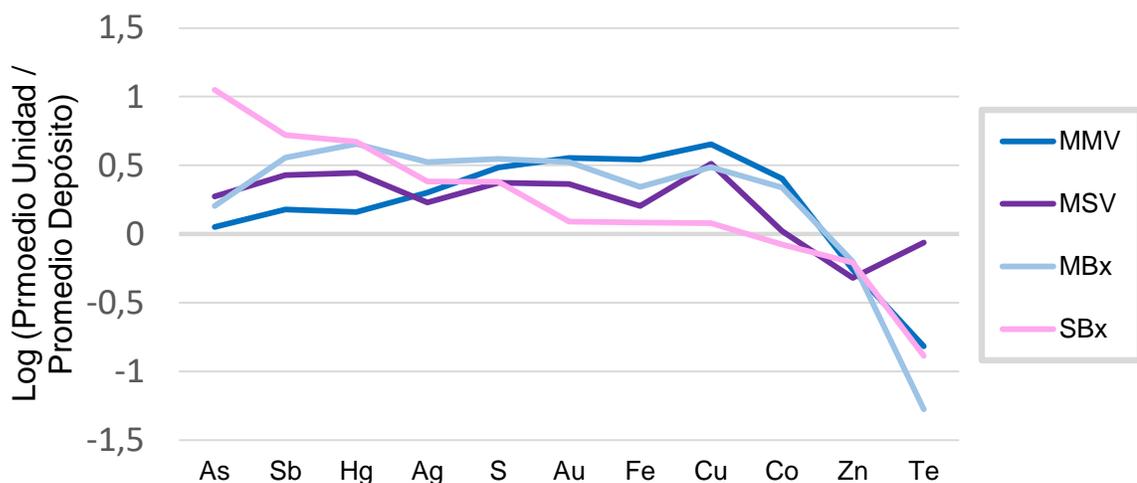


Figura 4.6: Diagrama de abundancia de elementos en unidades de óxidos de Fe.

En las 4 unidades con óxidos de hierro (MMV, MSV, MBx y SBx) los elementos estudiados se comportan de manera similar, con algunas variaciones en las concentraciones absolutas de éstos (Figura 4.6). Las unidades con magnetita (MMV y MBx) tienen mayor cobalto que las unidades con especularita (MSV y SBx), mientras que las unidades de brechas (MBx y SBx) tienen mayores valores de antimonio y mercurio que las unidades de vetas masivas (MMV y MSV). Por otro lado, el contenido de hierro es mayor en las unidades que presentan magnetita, lo cual se condice con el mayor porcentaje de hierro presente en este mineral (72%) por sobre la especularita (70%).

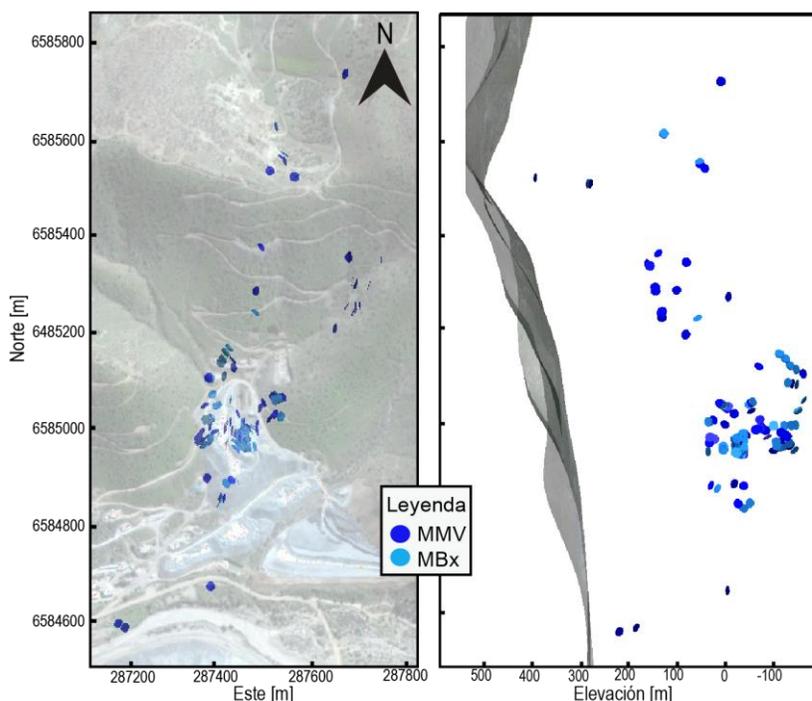


Figura 4.7: Mapa de distribución de muestras de MMV y MBx.

Con el fin de determinar si estas unidades presentan alguna correlación espacial aparte de la buena correlación entre los elementos estudiados, se realizaron 2 mapas con la distribución de las muestras en planta y en secciones NS con vista hacia el oeste. El primero corresponde a las unidades con magnetita y el segundo a las unidades con especularita.

Se observa una buena correlación espacial entre las unidades MMV y MBx, con una mayor concentración de datos en la zona ubicada entre las coordenadas 6485200 N/ 287400 E y 6585000 N/ 287600 E, y entre las cotas -200 y 50 m.s.n.m (Figura 4.7).

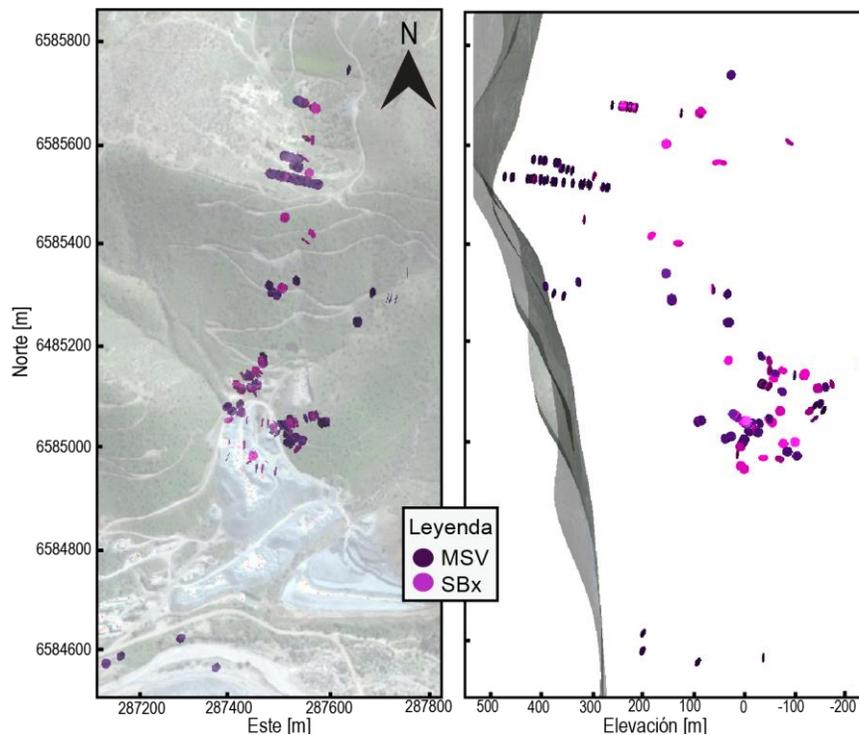


Figura 4.8: Mapa de distribución de muestras de MSV y SBx.

En la Figura 4.8 se observa una buena correlación espacial entre los interceptos de MSV y SBx, con la misma zona de mayor densidad de datos que se presenta en las unidades MMV y MBx.

Junto con lo observado en la geoquímica de las unidades y la distribución espacial de las muestras, sumado a lo planteado por Ormeño *et al.* (2011), Campos (2014) y Sillitoe (2015), en donde reconocen un estilo de mineralización caracterizado por la inyección de fluidos ricos en óxidos de hierro, con variaciones de magnetita, especularita y mushketovita, asociados a un sistema hidrotermal con características de IOCG que se emplaza principalmente por estructuras de rumbo NW, se ha determinado considerar estas 4 unidades como una sola para realizar el estudio de la distribución de mercurio en el depósito en el capítulo de más adelante.

4.3 Estudio calcográfico

Este apartado corresponde al estudio de 6 cortes pulidos de muestras de testigos de sondajes distribuidas a lo largo del yacimiento, sumado a la información obtenida de un estudio de microscopía electrónica de barrido presente en un informe de Paula Cornejo (en edición).

Las características de las muestras de sondaje a partir de las cuales se obtuvieron los cortes pulidos se resumen en la Tabla 4.13. Cabe destacar que los análisis químicos realizados abarcan un metro de testigo de sondaje, mientras que los cortes corresponden a un tramo menor a 10 centímetros dentro del metro de testigo de sondaje.

Muestra	Litología	Au [ppm]	Cu [%]	Fe [%]	Hg [ppm]	As [ppm]	Sb [ppm]	Te [ppm]
2183	Skn	4,36	1,79	10,1	16			
8079	Skn	14,2	0,28	19	36			
8084	Skn	4,21	0,5	13,7	991	121	350	22
24073	MQV	13,55	0,01	6,33	14			
26713	MQV en HBx	8,94	0,13	5,06	258			
71278	MQV	12,3	3,12	6,27	1260	672	2780	3.26

La mitad de las muestras tienen asignada litológicamente la unidad de skarn, mientras que la otra mitad corresponden a la unidad veta de cuarzo masivo, a excepción de la muestra 26713 que corresponde a un fragmento de esta veta dentro de la brecha hidrotermal. De las 6, todas presentan análisis químico de oro, cobre, hierro y mercurio, mientras que sólo 2 incluyen además análisis de arsénico, antimonio y telurio (Tabla 4.13).

Para el caso de las muestras asociadas a la MQV, las concentraciones de mercurio son variadas. La muestra 24073 tiene una concentración baja de mercurio comparado con la concentración promedio de la unidad (55 ppm), mientras que las muestras 26713 y 71278 superan considerablemente este valor, siendo la última la de mayor anomalía. Sumado a esto, la muestra 71278 contiene las mayores concentraciones de arsénico y antimonio, no así de telurio.

En la muestra 8084 la concentración de mercurio es extremadamente alta, mientras que las concentraciones de antimonio, arsénico y telurio son moderadamente superiores a las concentraciones promedio de la unidad de Skarn (Tabla 4.8).

Para el caso de las muestras correspondientes a MQV, las concentraciones de mercurio varían de bajo a alto. La muestra 24073 tiene una concentración baja de mercurio comparado con la concentración promedio de la unidad (55 ppm), mientras que la muestra 26713 supera por más de 4 veces este valor.

De las 6 muestras, la 71278 tiene las concentraciones más altas de mercurio, arsénico y antimonio. A esto se suman valores relativamente normales de telurio comparado con el promedio en la unidad (Tabla 4.6).

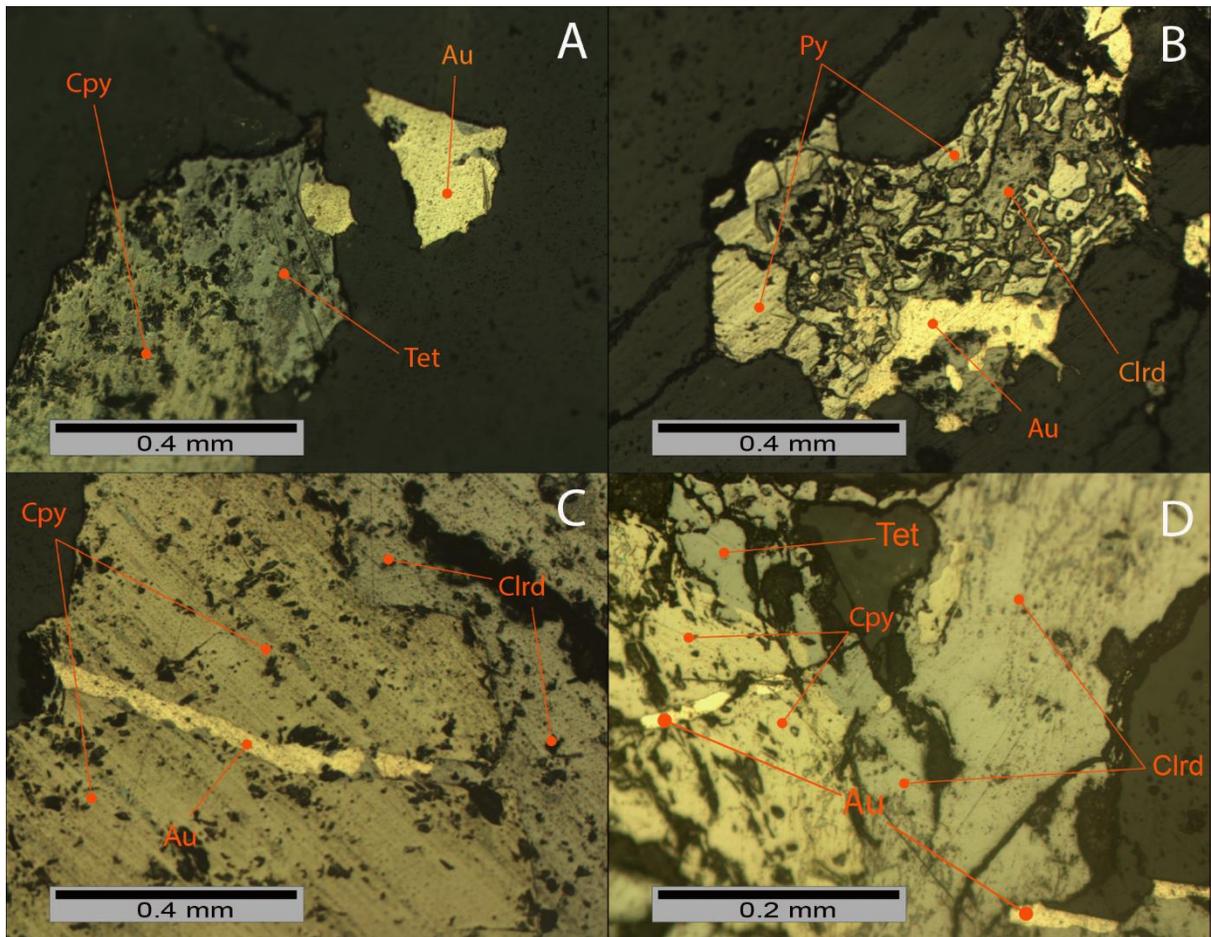


Figura 4.9: Microfotografías de la muestra 26713. A) Tetraedrita con oro nativo en borde de calcopirita. B) Coloradoita con oro nativo entre fracturas de pirita. C) Microvetilla de coloradoita con oro nativo en grano de calcopirita. D) Tetraedrita en reemplazo en bordes de calcopirita; coloradoita con oro nativo en bordes de grano y microvetillas.

La muestra 26713 presenta abundante mineralización de calcopirita entre granos de cuarzo, sumado a una menor cantidad de pirita diseminada. En los bordes de grano de la calcopirita se observa un leve reemplazo de tetraedrita y una fase de coloradoita asociada con oro nativo que precipitó directamente en estos márgenes (Figura 4.9D).

El oro se presenta como metal nativo en granos dentro de cristales de cuarzo (Figura 4.9A) o adherido a la coloradoita en micro fracturas y bordes de grano de calcopirita (Figura 4.9C y 4.9D). La fase de telurio de mercurio con oro nativo también genera micro brechización o reemplazo directo de los granos de pirita dejando una textura de tipo isla (Figura 4.9B).

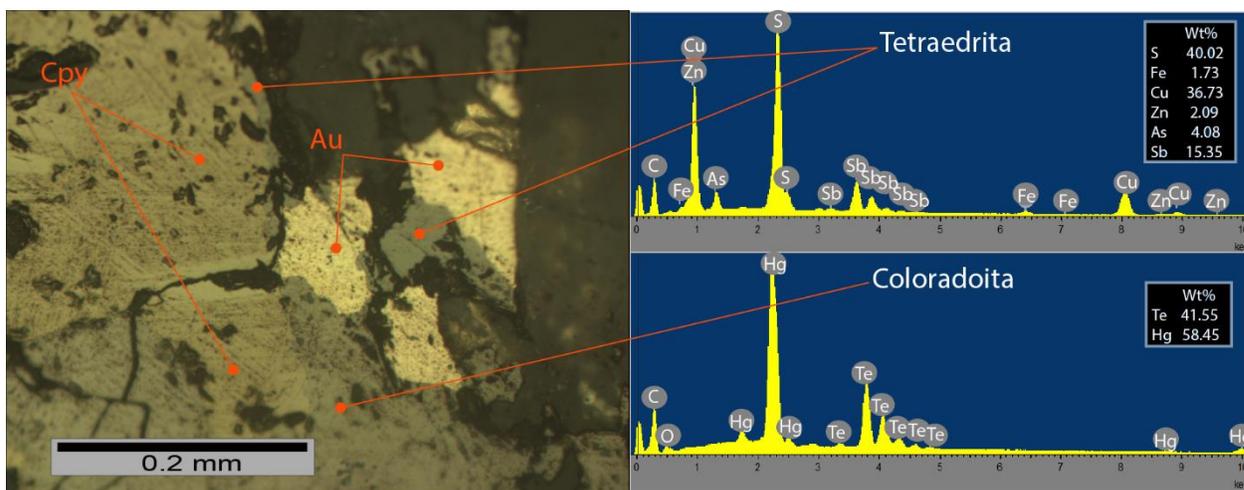


Figura 4.10: Microfotografía de la muestra 26713 con análisis de microscopio electrónico de barrido.

Las tetraedritas analizadas con microscopio electrónico de barrido (Cornejo, en edición) en la muestra 26713 no presentan concentraciones de mercurio, mientras que en contraste la coloradoita que alcanza hasta un 58.45 % en peso del elemento Hg (Figura 4.10).

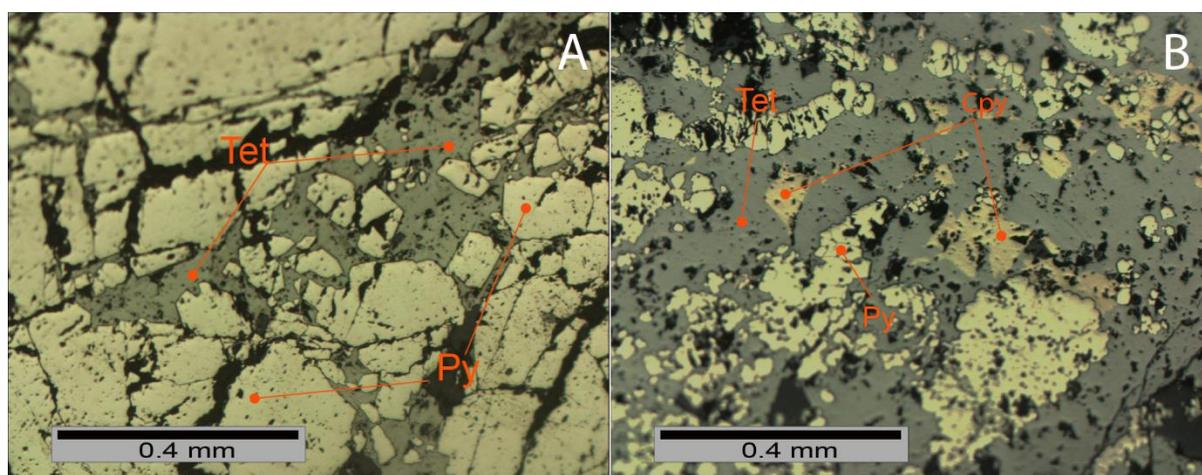


Figura 4.11: Microfotografía de la muestra 71278. A) Tetraedrita entre granos de pirita. B) Tetraedrita reemplazando en un 80% a calcopirita entre granos de pirita.

En la muestra 71278 se observa una gran ocurrencia metálica que corresponde principalmente a pirita (15%) de aspecto fracturado en contacto con tetraedrita (5%) que se presenta de forma continua entre los granos de pirita (Figura 4.11A). Se observan granos de calcopirita (2%) asociada con tetraedrita (Figura 4.11B). En esta muestra no se observa coloradoita.

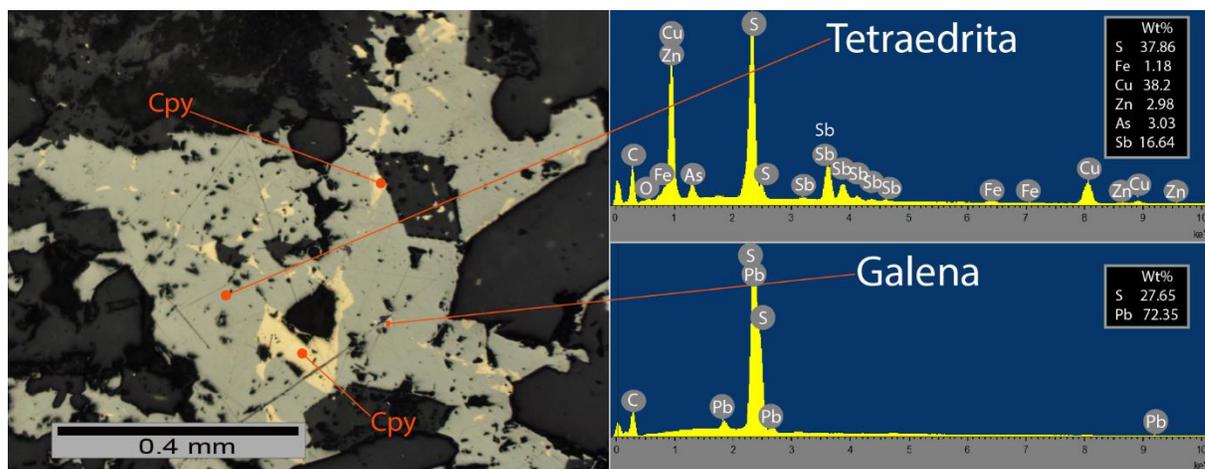


Figura 4.12: Microfotografía de la muestra 71278 con análisis de microscopio electrónico de barrido.

En el corte se reconoce textura de reemplazo de calcopirita por tetraedrita, aprovechando los bordes de grano y debilidades. Además, hay ocurrencia de galena entre los granos de calcopirita que están en contacto con tetraedrita (Figura 4.12). Las tetraedritas analizadas con microscopio electrónico de barrido no presentan concentraciones de mercurio al igual que en la muestra 26713.

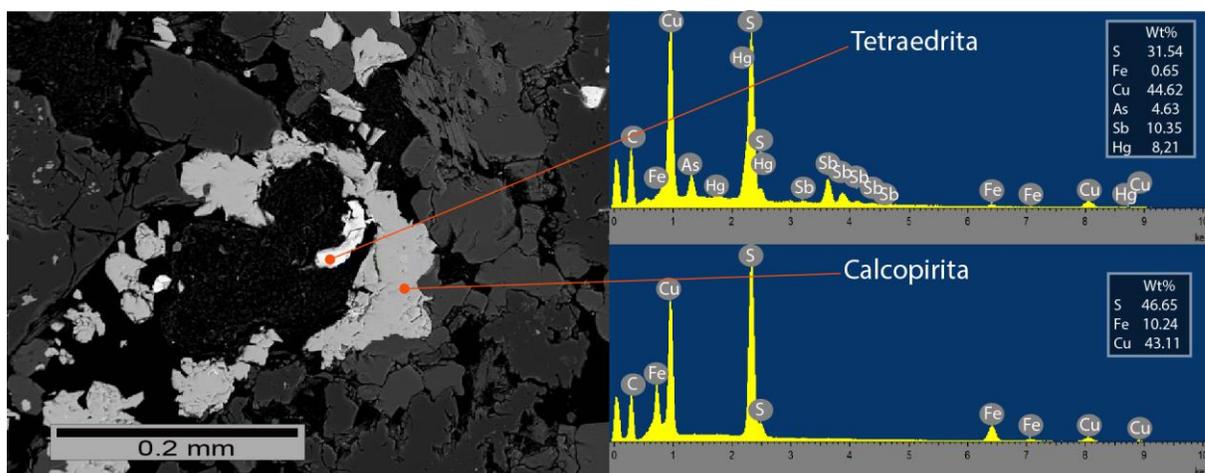


Figura 4.13: Microfotografía de la muestra 8084 tomada con microscopio electrónico de barrido. Modificado de (Conejo, en edición).

En la muestra 8084 se presenta tetraedrita con una concentración de 8.21 % en peso de mercurio (Figura 4.13), sustituyendo al zinc presente en los otros granos de tetraedrita observados. Este grano de tetraedrita se encuentra asociado con calcopirita.

Cabe destacar que en los cortes analizados no se observó ocurrencia de Cinabrio (HgS), sin embargo, Conejo (en edición) sí reconoce el mineral en trazas dentro de granos de calcopirita. Dada la baja ocurrencia de la especie en comparación al resto de las fases reconocidas, no se considera relevante para determinar la distribución de mercurio en el capítulo de más adelante.

4.4 Estudio de concentrado de planta

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el estudio geoquímico y calcográfico de las 3 muestras de concentrado. Estas muestras de concentrado fueron obtenidas directamente del flujo de mineral concentrado desde la planta instalada en la mina Tambo de Oro. La alimentación a planta en ese momento correspondía a extracciones de mineral desde bancos ubicados en la zona norte y sur del depósito, en las cotas -54 y -86 m s. n. m. específicamente, zonas en las cuales está alojada la brecha hidrotermal (HBx).

Las concentraciones de telurio presentes en estas muestras (Tabla 4.14) superan a la concentración promedio del elemento en el depósito (Tabla 4.5), sobre todo las muestras C1 y C3, no así el antimonio que se presenta en concentraciones relativamente normales comparado con el promedio de las unidades mineralizadas (Tablas 4.6 – 4.12).

En la siguiente tabla (Tabla 4.14) se destacan 4 rangos de coeficientes de correlación, de 0,7 a 0,999 en morado, de 0,5 a 0,699 en rojo, de 0,2 a 0,499 en naranja y de 0,1 a 0,199 en amarillo.

Tabla 4.14: Concentraciones de las muestras de concentrado de planta. Matriz de correlación de Pearson entre elementos de interés.									
Muestra	Cu %	Fe %	Au ppm	Hg ppm	Te ppm	As ppm	Sb ppm	Pb ppm	Zn ppm
C1	4,69	33,3	433,2	133	506	93	37,9	19	90
C2	4,77	32,3	59,1	61	66,5	83	56,7	24	140
C3	7,89	34,4	375,6	102	424	56	32,6	17	70
Correlación de Pearson									
Elementos	Cu	Fe	Au	Hg	Te	As	Sb	Pb	Zn
Cu	1,000	0,869	0,351	0,058	0,320	-0,971	-0,654	-0,705	-0,705
Fe	0,869	1,000	0,768	0,545	0,747	-0,725	-0,943	-0,964	-0,964
Au	0,351	0,768	1,000	0,955	0,999	-0,116	-0,938	-0,911	-0,911
Hg	0,058	0,545	0,955	1,000	0,965	0,183	-0,793	-0,749	-0,749
Te	0,320	0,747	0,999	0,965	1,000	-0,083	-0,926	-0,897	-0,897
As	-0,971	-0,725	-0,116	0,183	-0,083	1,000	0,453	0,514	0,514
Sb	-0,654	-0,943	-0,938	-0,793	-0,926	0,453	1,000	0,998	0,998
Pb	-0,705	-0,964	-0,911	-0,749	-0,897	0,514	0,998	1,000	0,999
Zn	-0,705	-0,964	-0,911	-0,749	-0,897	0,514	0,998	0,999	1,000

La concentración de telurio está directamente relacionada con la concentración de oro y de mercurio. También se observa que cuando el Au, Hg y Te son bajos, las concentraciones de Sb, Pb y Zn aumentan (Tabla 4.14).

Cuando el oro es bajo (C2) la concentración de mercurio tiende a igualarse con la concentración de telurio, a diferencia de lo que ocurre en las muestras C1 y C3, en donde el Te supera por más de 3 veces al Hg.

De los coeficientes de correlación, se observa que hay dos grupos, el primero involucra a los elementos Cu, Fe, Au, Hg y Te, mientras que la segunda asociación corresponde a los elementos As, Sb, Pb y Zn.

La mineralogía presente en las briquetas de concentrados corresponde principalmente a pirita con calcopirita, con un promedio de 70 y 25 % respectivamente sin contar la ganga, y una menor cantidad de otros minerales opacos, entre los cuales se encontraron coloradoita, bornita, molibdenita, tetraedrita-tenantita, hematita y magnetita. En estas muestras no se reconoce oro nativo.

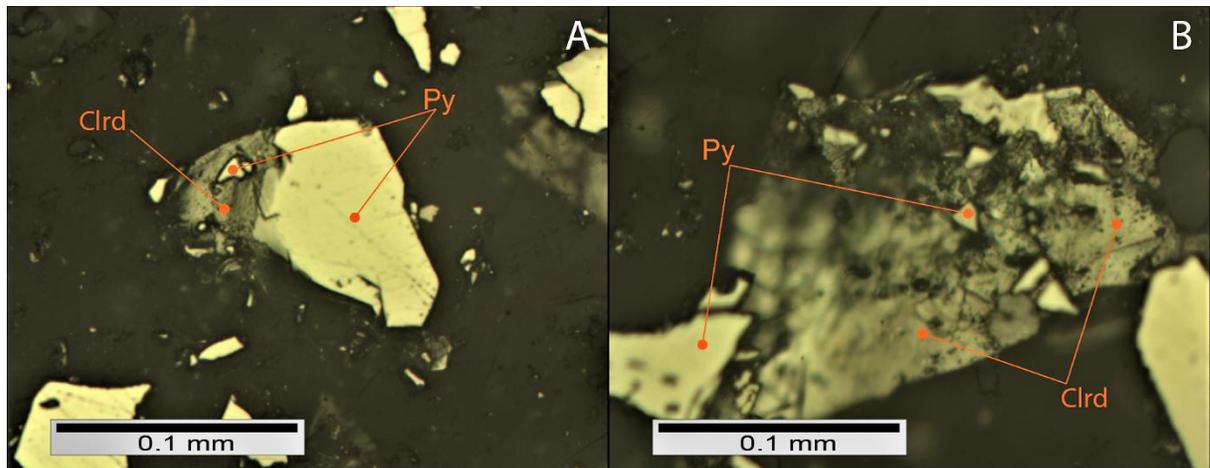


Figura 4.14: Microfotografía de la muestra C1. A) Coloradoita en borde de grano de pirita, con fracciones de pirita ocluida. B) Coloradoita con fracciones de pirita.

La coloradoita presente se puede reconocer tanto en los bordes de granos de pirita con o sin fracciones de piritas ocluidas (Figura 4.14A y Figura 4.15A) o como granos aislados con piritas fracturadas “flotando” dentro de los granos de coloradoita (Figura 4.14B). El porcentaje de coloradoita en las muestras C1 y C3 es muy bajo, no superando el 1 %, mientras que en la muestra C2 no se reconoce.

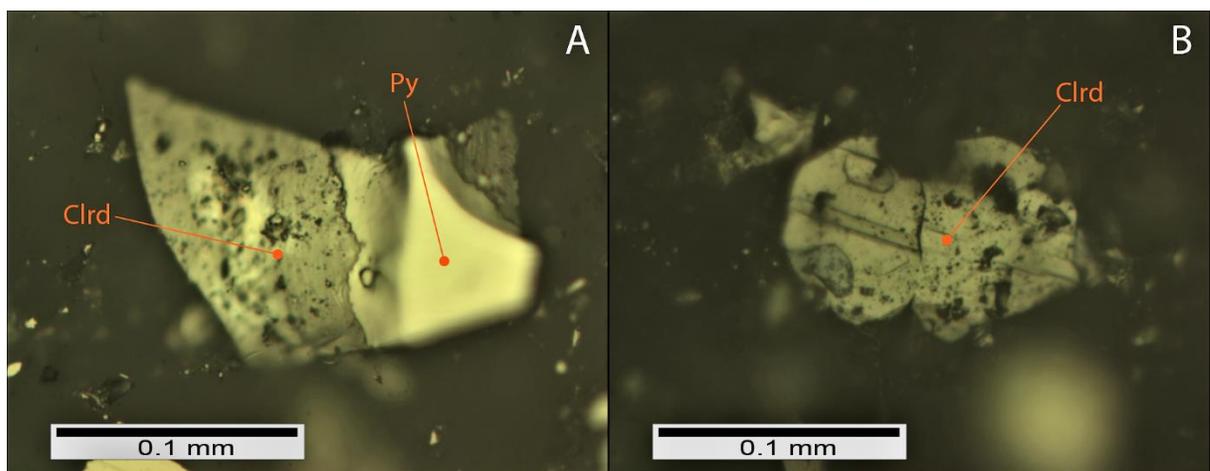


Figura 4.15: Microfotografía de la muestra C1. A) Coloradoita en paragénesis con pirita. B) Coloradoita con mineral gris ocluido.

También en la muestra C1 se observaron granos de coloradoita aislados con un mineral ocluido gris azulado desconocido (Figura 4.15B). El tamaño de los granos de coloradoita varía de 0.05 mm a 2 mm y se ve claramente una menor dureza que en los granos de pirita. El color de los granos de coloradoita presente en las muestras C1 y C3 es un gris “sucio” y de aspecto craquelado.

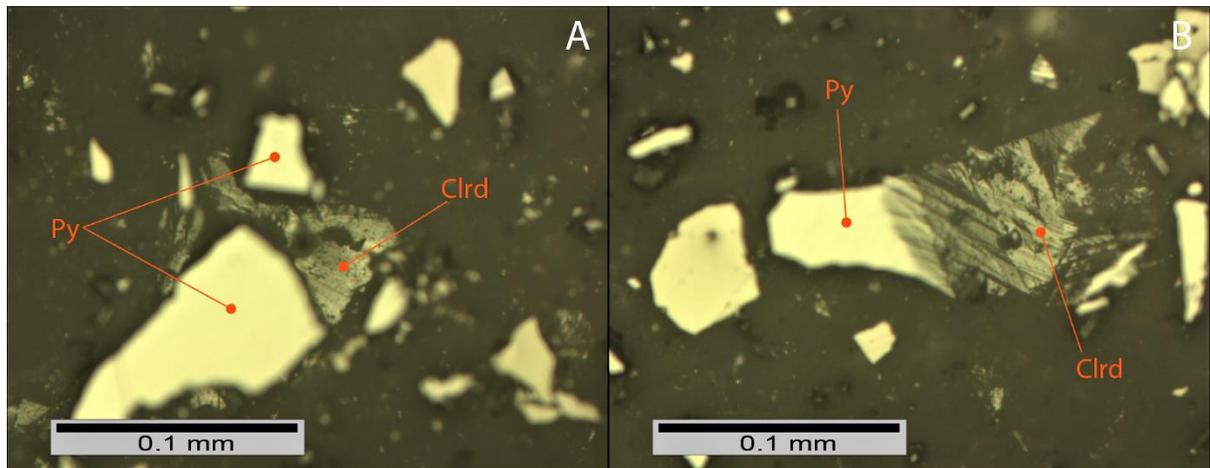


Figura 4.16: Microfotografía de la muestra C3. A) Coloradoita en bordes de grano de pirita. B) Coloradoita en contacto con pirita.

La ocurrencia de las piritas junto con la coloradoita se asemeja a la asociación observada en el corte pulido de la muestra 26713 (Figura 4.9B), en donde se observan piritas fracturadas en un grano de coloradoita asociada con oro nativo.

4.6 Distribución

En este apartado se presenta el modelo 3D del depósito Tambo de Oro generado con el programa Leapfrog Geo (v.4.1.2), a partir del cual se estudió la distribución de mercurio en conjunto con el antimonio y el telurio para así determinar las zonas con ocurrencia de minerales portadores de mercurio reconocidos en los capítulos anteriores, tal como la serie de la tetraedrita-tenantita y la coloradoita.

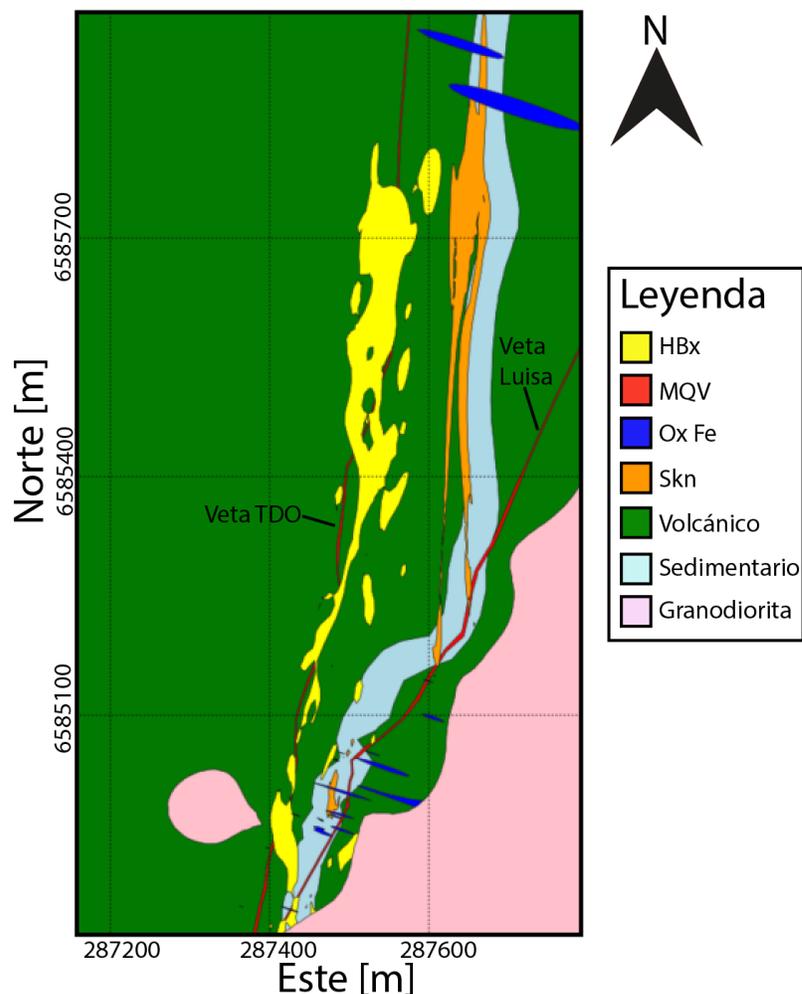


Figura 4.17: Planta -5 [m] de modelo 3D del depósito Tambo de Oro.

El modelo 3D se desarrolló utilizando la base de datos ICP generada en el capítulo 4.1, sumado a la información de un modelo realizado por la empresa HMC Gold el año 2016. En total se generaron 7 litologías distintas, Volcánico, Sedimentario, Granodiorita, Vetas masivas de cuarzo (MQV), Brecha hidrotermal (HBx), Skarn (Skn) y Vetas y Brechas de óxidos de hierro (Ox Fe). Cabe destacar que la unidad MQV incluye dos vetas (TDO y Luisa) que serán analizadas por separado en este estudio (Figura 4.17).

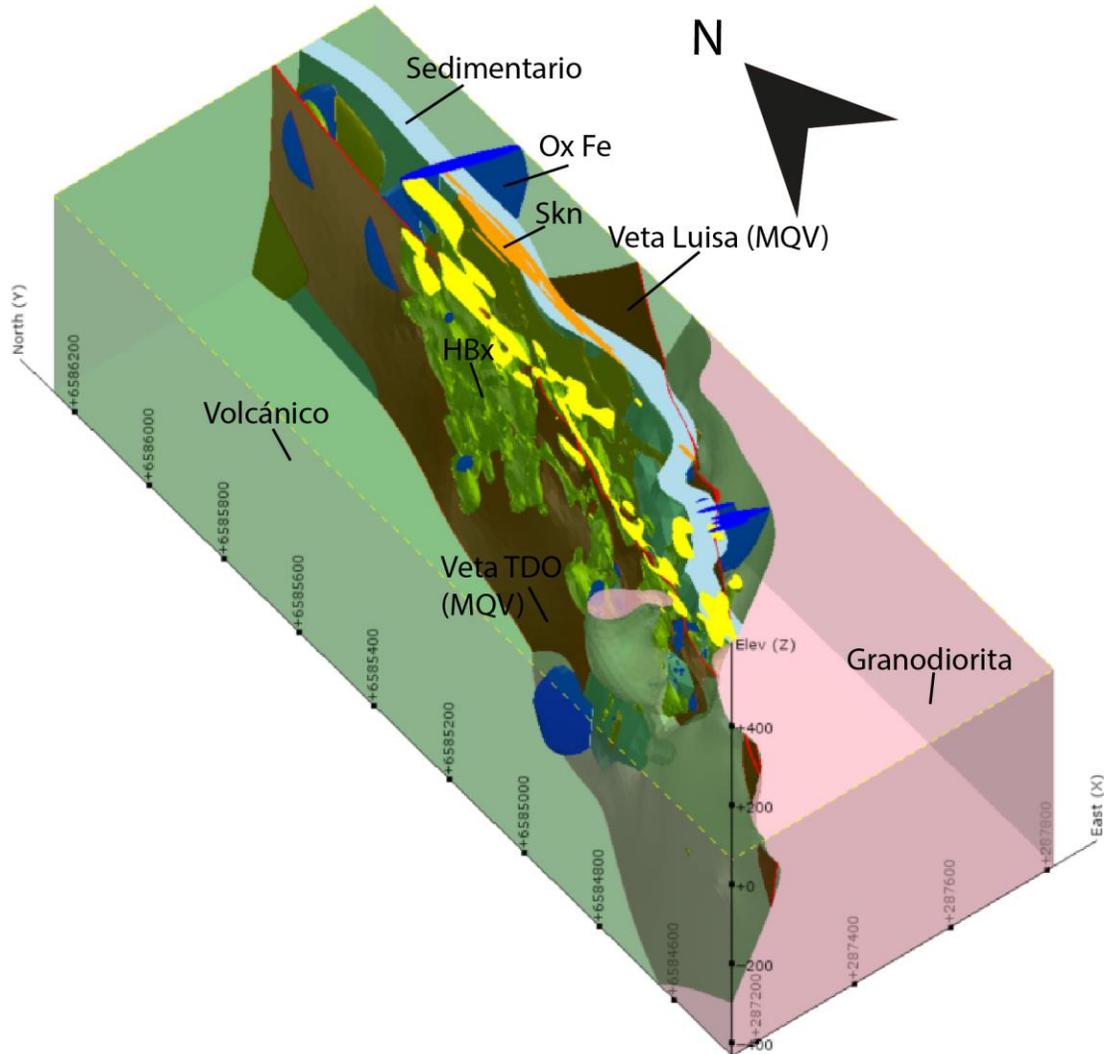


Figura 4.18: Modelo 3D del depósito Tambo de Oro (Planta -5).

Este capítulo se concentra en las leyes críticas de mercurio que afectan la producción minera en la faena, por lo tanto, para este elemento se utilizan valores mayores o iguales a los 5 ppm. Con respecto al antimonio y el telurio, en primer lugar, se calcularon las concentraciones promedio de estos elementos en los minerales portadores de mercurio observados (tetraedrita-tenantita y coloradoita), para luego compararlos con la concentración de mercurio presente en los mismos. Las concentraciones de antimonio y telurio asignadas para este estudio fueron de 10 ppm y 5 ppm respectivamente, dado que la razón entre el mercurio y el antimonio en la serie de la tetraedrita-tenantita es aproximadamente 1:2, mientras que en la coloradoita la razón entre el mercurio con el telurio es más cercana a 1:1 (Tabla 4.15).

Tabla 4.15: Porcentaje de Hg, Sb y Te en las especies portadoras de mercurio en Tambo de Oro. También se indica la razón aproximada entre Hg y Sb o Te.				
Mineral	Hg [Wt%]	Sb [Wt%]	Te [Wt%]	Razon Hg : Sb o Te
Tetraedrita-Tenantita	8	15	-	~ 1 : 2
Coloradoita	58	-	41	~ 1 : 1

A continuación, se presentan los sólidos de Hg, Sb y Te de leyes críticas generados en el depósito y en las unidades que controlan la mineralización, para observar cómo se distribuyen por separado y en qué zonas se sobreponen.

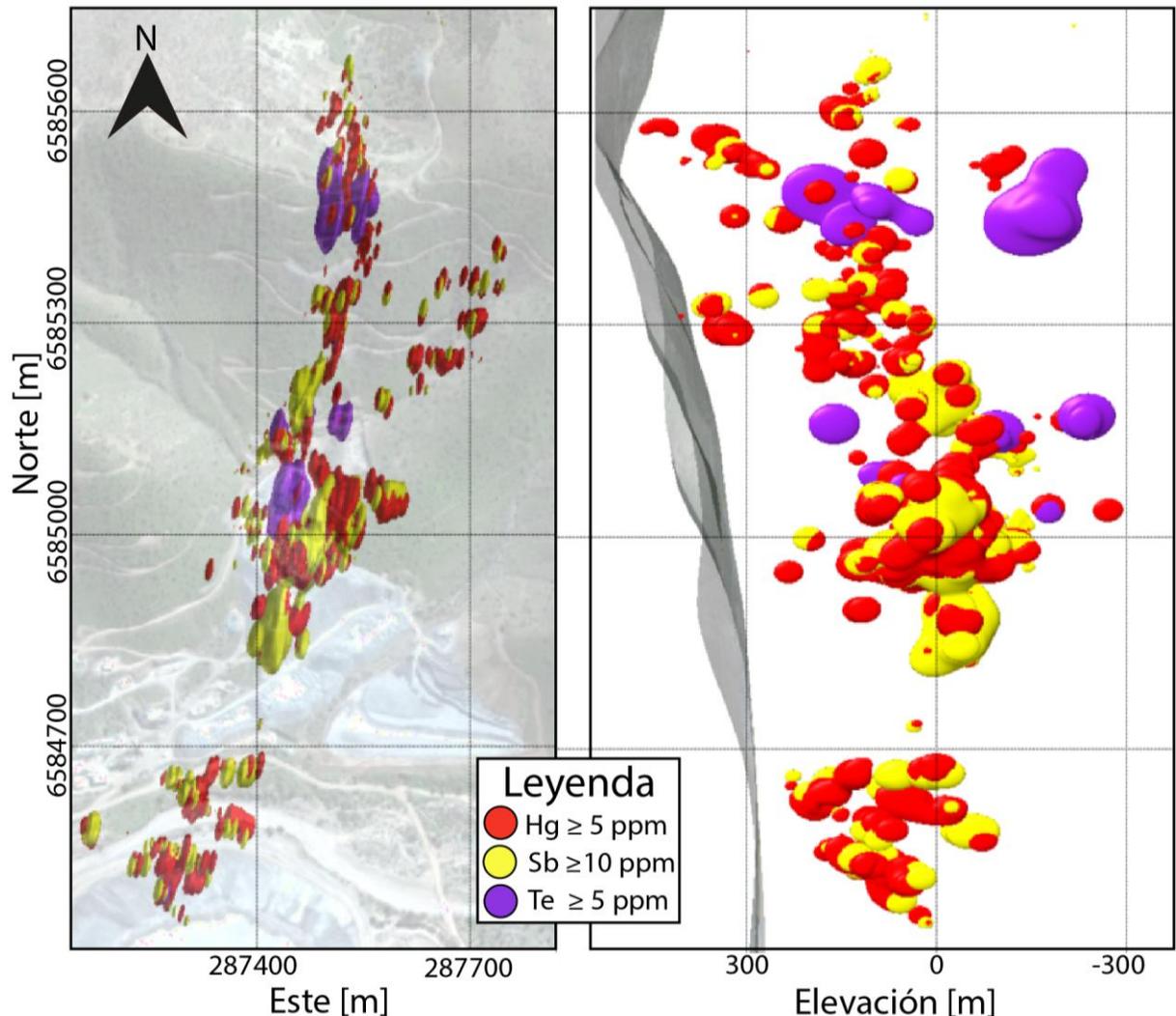


Figura 4.19: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en Tambo de Oro.

Las leyes de mercurio sobre los 5 ppm se extienden a lo largo de todo el depósito de manera localizada, alcanzando tanto las cotas inferiores (-300 m s. n. m.) como las superiores (+400 m s. n. m.). La mayor concentración de valores críticos de mercurio se observan a profundidades que van desde los -100 metros hasta los 200 metros sobre el nivel del mar. Además, se destaca una acumulación de valores sobre los 5 ppm en la zona central del depósito, entre las coordenadas 6584900N - 6585100 N y 287400 E - 287550 E (Figura 4.19).

Las isosuperficies de leyes de antimonio iguales o mayores a 10 ppm a lo largo del depósito son similares a las observadas en el mercurio, a diferencia que éstas alcanzan una profundidad máxima de -150 m s. n. m. Al igual que en la distribución de mercurio, se observa una acumulación de valores críticos entre las coordenadas 6584900N - 6585100 N y 287400 E - 287550 E (Figura 4.19).

La distribución de leyes de telurio crítico (≥ 5 ppm) en el depósito se concentra en la zona central de la brecha hidrotermal, en profundidades que varían desde los -300 metros hasta los 200 metros sobre el nivel del mar (Figura 4.19).

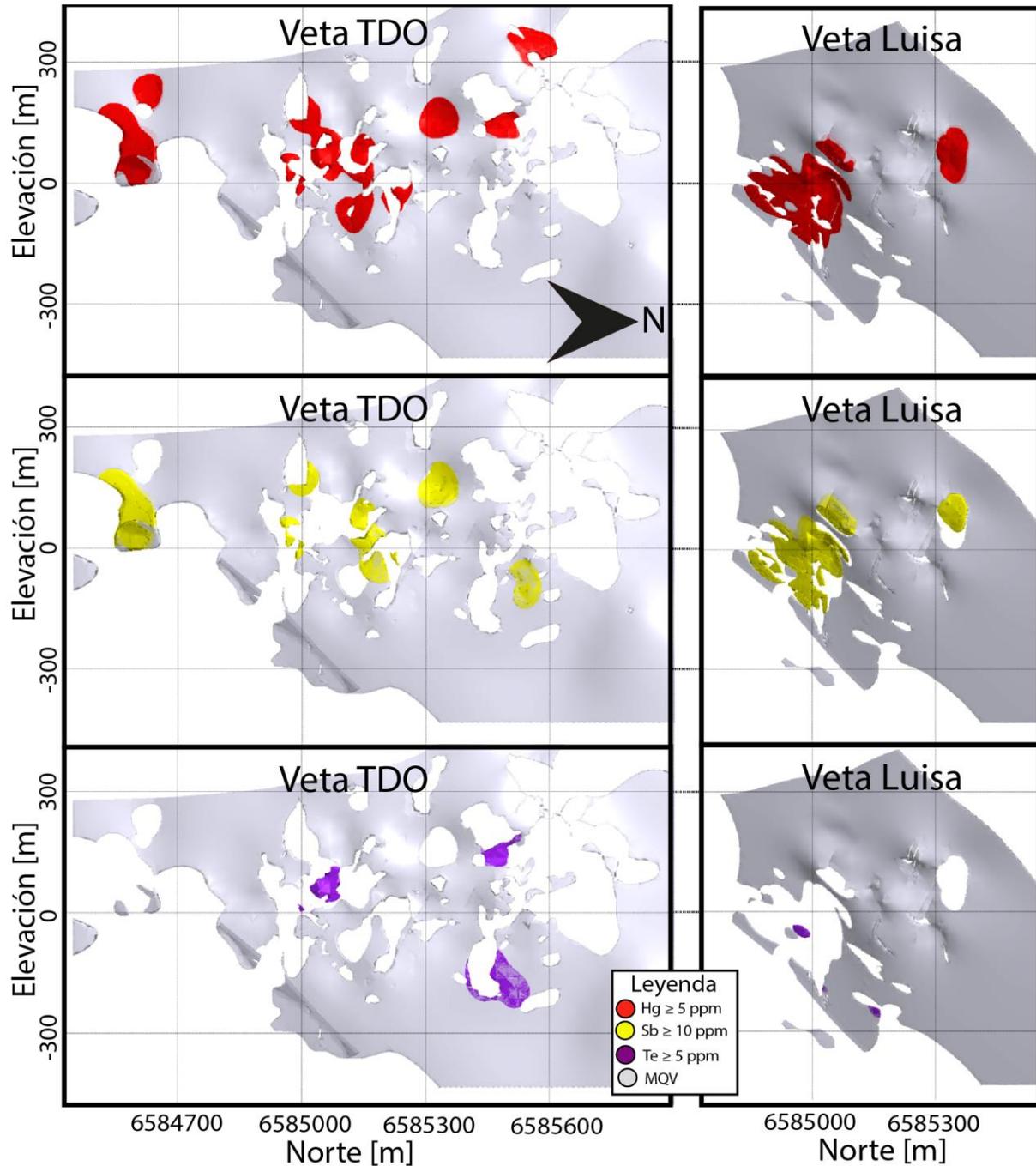


Figura 4.20: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en la unidad MQV.

Con respecto a las vetas de cuarzo masivo (MQV), en ambas (Veta TDO y Veta Luisa), la distribución de mercurio y antimonio crítico es muy similar, observándose una mayor concentración de éstos en la zona central cercano a la cordenada 6585000 N, entre las cotas -150 y +200 m.s.n.m (Figura 4.20).

En la Veta TDO, el teluro crítico se observa en tres zonas distintas acotadas entre las coordenadas 6585000 N y 6585600 N, de las cuales sólo dos se interceptan con sólidos de mercurio crítico. Por otro lado, la Veta Luisa no presenta mayores concentraciones de teluro, a excepción de la zona sur, en donde además de interceptarse con sólidos de mercurio crítico, está localizada la brecha hidrotermal (Figura 4.20).

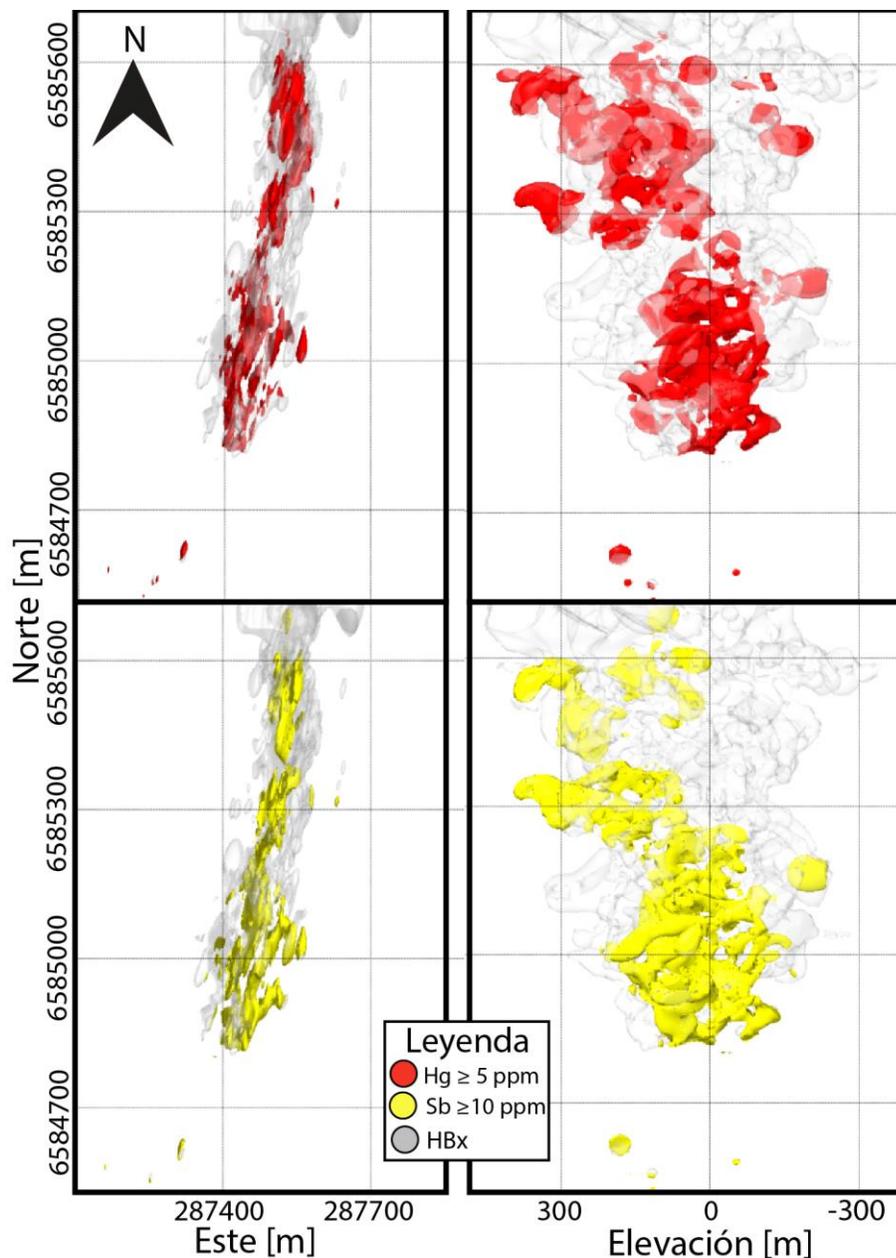


Figura 4.21: Distribución de Hg y Sb críticos en la unidad HBx.

En la unidad de brecha hidrotermal (HBx), el antimonio y el mercurio crítico siguen la misma distribución (Figura 4.21), siendo la zona sur central y la zona central superior en donde se interceptan los sólidos. En cuanto al teluro crítico, se observa una menor densidad de sólidos en comparación con el mercurio y el antimonio, lo cual se explica con la baja cantidad de muestras con análisis químico de este elemento.

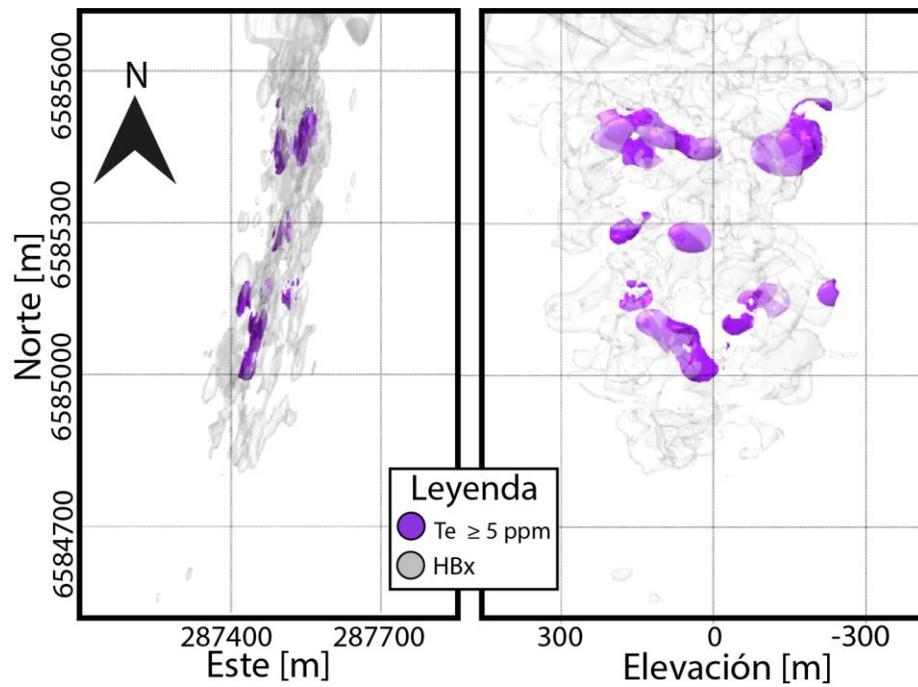


Figura 4.22: Distribución de Te crítico en la unidad HBx.

Cabe destacar que la gran mayoría de los sólidos de telurio con leyes superiores o iguales a 5 ppm se interceptan con sólidos de mercurio crítico (Figura 4.22).

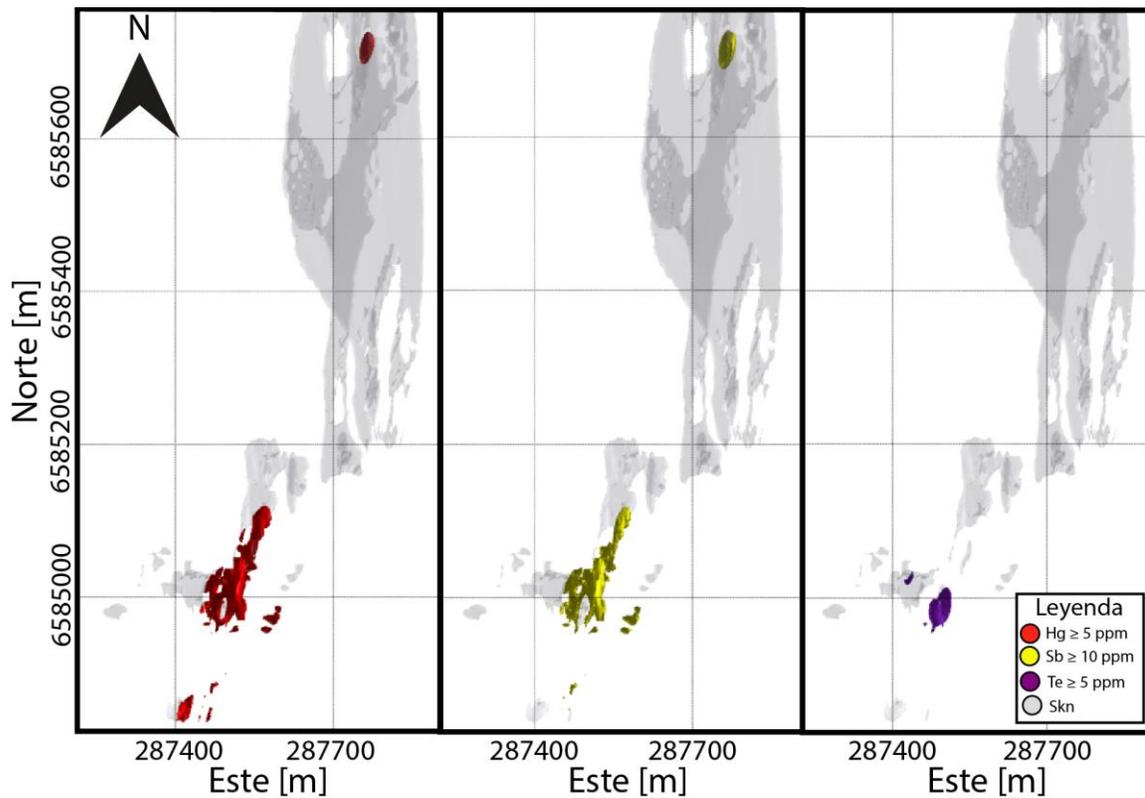


Figura 4.23: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en la unidad Skn.

En la unidad de skarn, la distribución de antimonio y mercurio crítico se concentra principalmente en la zona sur, zona en la cual se encuentra la brecha hidrotermal, sin embargo, también se observa una intercepción de estos sólidos alrededor de la coordenada 6585700 N y 287750 E, entre las cotas -30 y +55 m s. n. m. Con respecto al telurio crítico en la unidad, éste se presenta sólo en la zona asociada a la brecha hidrotermal, en donde además se intercepta con algunos sólidos de leyes de mercurio igual o superior a los 5 ppm (Figura 4.23).

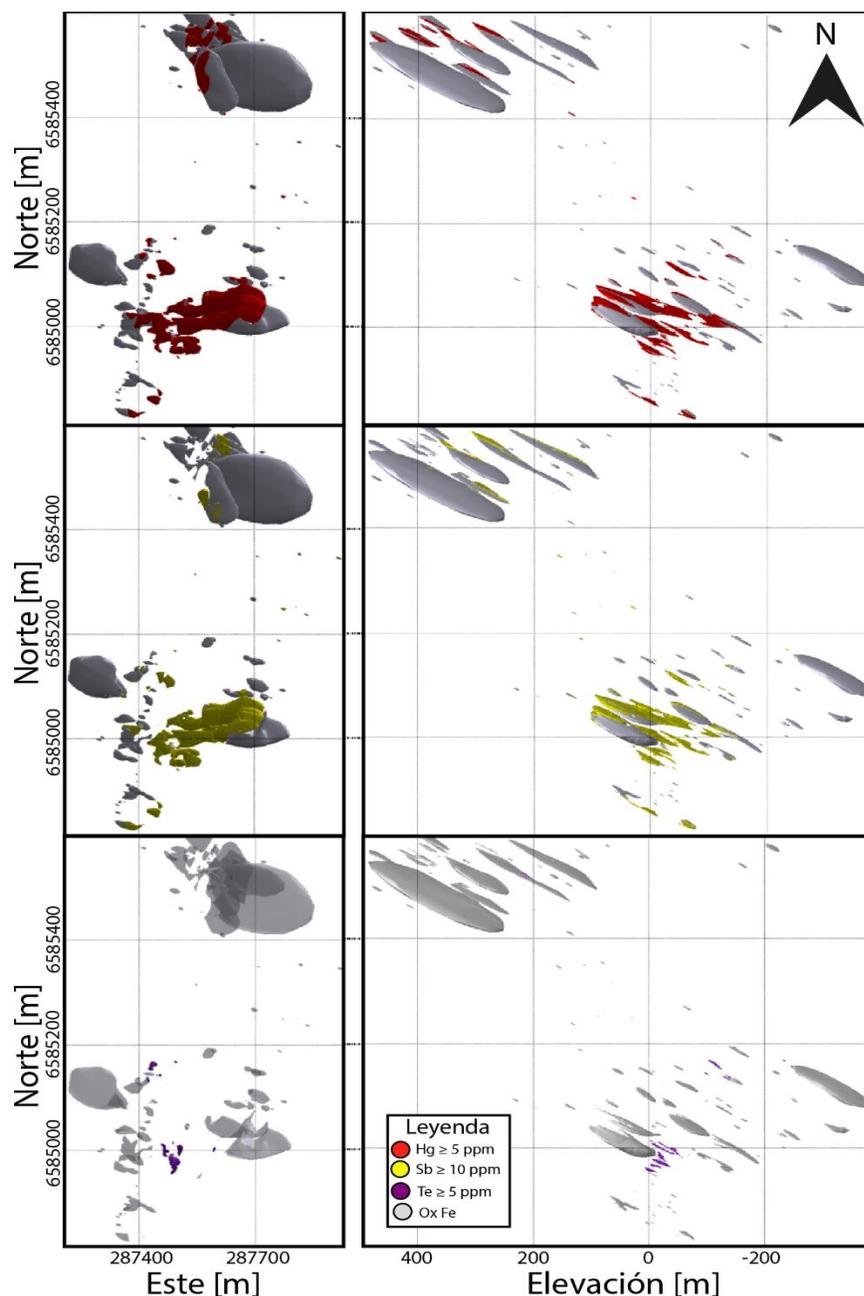


Figura 4.24: Distribución de Hg, Sb y Te críticos en la unidad Ox Fe.

La unidad de óxidos de hierro (Ox Fe), al igual que el resto de las unidades, presenta una distribución de mercurio y antimonio muy similar, interceptados en la mayoría de los sólidos (Figura 4.24). Se observan dos zonas principales de intercepto entre el mercurio y antimonio crítico, el primero en la zona centro sur del depósito, entre las cotas -100 y +100 m.s.n.m, y el segundo en la zona central, entre las cotas +200 y +400 m s. n. m.

El telurio crítico en la unidad Ox Fe es leve en comparación al resto de las unidades y también se encuentra restringido a la zona de la brecha hidrotermal, zona en donde además se intercepta con leyes críticas de mercurio (Figura 4.24).

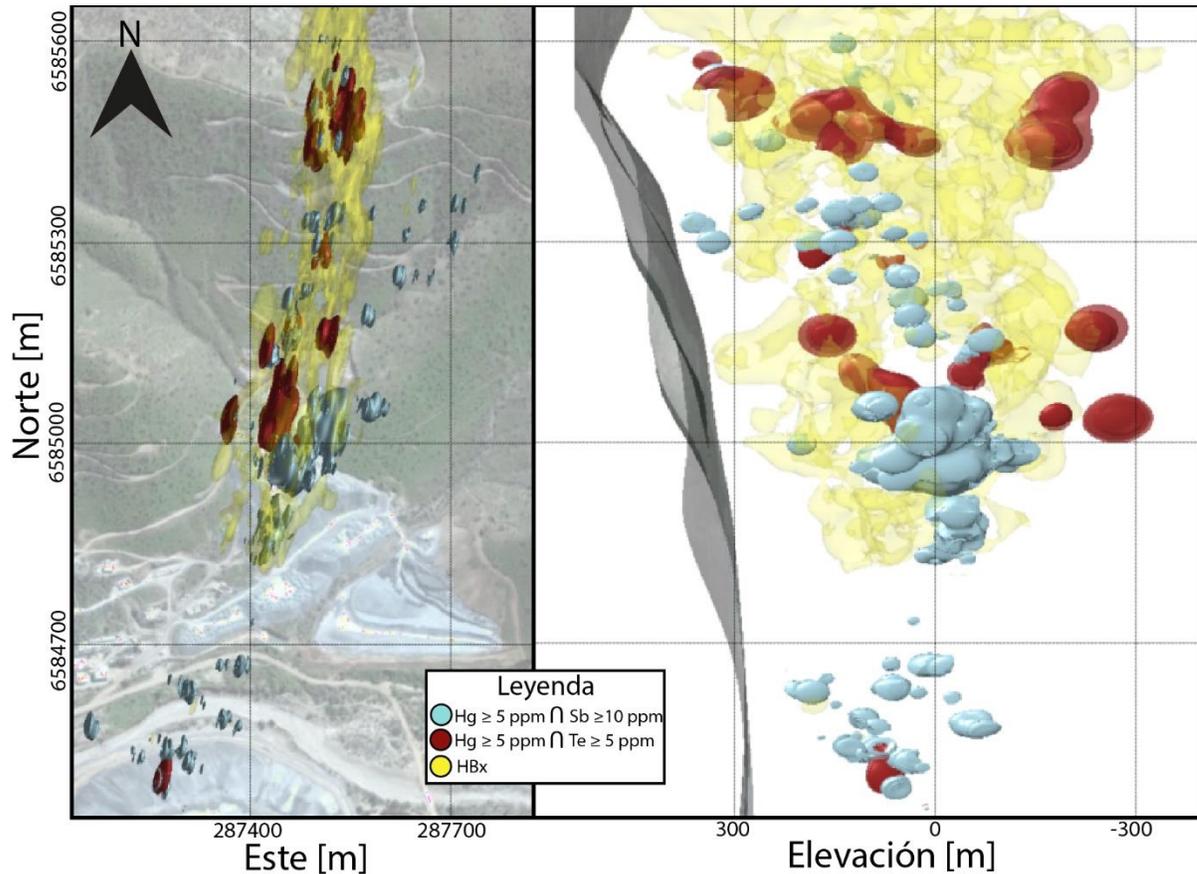


Figura 4.25: Distribución de interceptos entre Hg y Sb críticos y Hg y Te críticos. Se incluye a la unidad HBx.

La distribución de los sólidos de isoleyes de mercurio crítico (≥ 5 ppm) interceptados con sólidos de antimonio crítico (≥ 10 ppm) se distribuyen a lo largo de todo el depósito, enfocándose principalmente entre las coordenadas 6584900 N - 6585100 N y 287450 E - 287550 E, y las cotas -100 y 100 m s. n. m. (Figura 4.25), indicando una mayor ocurrencia de sulfosales de la serie de la tetraedrita-tenantita en esos sectores.

Los sólidos generados a partir de la intercepción de telurio crítico (≥ 5 ppm) junto con mercurio crítico (≥ 5 ppm) se reconocen sólo en la zona de la brecha hidrotermal (Figura 4.25), zona en donde habría una mayor probabilidad de ocurrencia de coloradoita.

El volumen total de las zonas en donde hay intercepción de mercurio con antimonio críticos supera por más de 6 veces a las zonas en donde hay intercepción de mercurio con telurio, lo que se infiere como una mayor ocurrencia mineral de la serie de tetraedrita-tenantita en comparación a la ocurrencia de coloradoita en el depósito.

5 Discusión

5.1 Base de datos

Uno de los factores que debe ser considerado es verificar los distintos procedimientos y protocolos que se utilizan para obtener las muestras de sondajes, así como también el mapeo litológico de sondajes que se realiza dentro de la faena. La mayoría del estudio se enfoca en las unidades mineralizadas presentes en el depósito, por ende, un error de mapeo puede repercutir en resultados inciertos.

El mercurio es de los elementos con mayor facilidad a la volatilización debido a sus propiedades fisicoquímicas, por lo que el tratamiento de las muestras debe ser manejado con mucha rigurosidad, especialmente en el proceso de preparación y secado de éstas, dado que al someterlas a temperaturas relativamente altas (sobre los 150°C) el mercurio en las especies mineralógicas comienza a volatilizarse, perjudicando la evaluación química posterior (Sierra *et al.*, 2015). En la faena, se exige una temperatura máxima de 60°C para el secado de las muestras que se envían a análisis químico, asegurando así que no se volatilice.

El análisis utilizado para determinar el mercurio y el resto de los elementos (a excepción del oro) corresponde a ME-ICP41, el cual incluye una digestión de agua regia (HNO₃ y HCL en una razón 1:3) capaz de disolver eficientemente las especies de mercurio junto con el resto de los minerales. Sin embargo, el método de análisis ICP utilizado tiene límites de detección inferior tan altos que los elementos de mayor interés no se detectan hasta muy por encima del umbral de importancia (Tabla 3.1), así como también no contiene algunos elementos que generalmente están asociados a epitermales de oro, como el telurio y el selenio (Nekrasov, 1996). Es por esto que la coloradoíta (HgTe) no se detectó hasta hace poco utilizando el método ME-MS61, mientras que otras especies minerales pueden existir sin ser detectadas aún.

Para determinar los elementos anómalos en el depósito se compararon sus promedios con los valores promedio de la corteza terrestre en zonas sin actividad hidrotermal determinados por diferentes autores (Clarke y Washington, 1924; Taylor, 1964). Estos valores pueden ser poco representativos de la zona de estudio, pero aun así las grandes anomalías presentes en el depósito se reconocen fácilmente.

5.2 Estudio geoquímico

5.2.1 Análisis univariable

El mercurio presente en el depósito tiene una variabilidad muy alta, con alrededor del 90 % de sus valores bajo la media (7,529 ppm) y el otro 10 % entre 7,529 ppm y 1120 ppm (Tabla 4.2), correspondiendo así estos últimos a valores anómalos dentro de las concentraciones presentes en el depósito. Sin embargo, este 10 % es necesario para determinar el comportamiento del mercurio cuando se presenta en concentraciones altas y para evaluar las correlaciones con el resto de los elementos de interés. Dicho lo anterior, para este apartado se eliminaron sólo 16 valores extremos del elemento, es decir el 0,1 % de los datos.

Con respecto a las poblaciones de datos de Hg definidas en base a los gráficos de estadísticas generados (Figura 4.4), hay solamente una que no incluye concentraciones de Hg crítico (≥ 5 ppm), sin embargo, tal como se mencionó anteriormente, esa población ($\text{Hg} \leq 0,5$ ppm) corresponde a la mayoría de los datos.

Alrededor del 25 % de los datos de la base ICP corresponden a la unidad HBx, mientras que entre el resto de las unidades la concentración de datos varía entre un 0,6 % (MMV) y un 3,3 % (Skarn). Esta diferencia podría generar un sesgo en el análisis, sin embargo, la unidad que menos datos tiene corresponde a la MMV con 96 interceptos codificados, cantidad que se considera representativa para un estudio estadístico.

5.2.2 Análisis multivariable

La gran cantidad de datos con valores bajo el límite de detección que se presenta en el mercurio, antimonio, plomo y plata, puede generar un error en este análisis, dado que al estar éstos representados por un valor específico (0,5 ppm en el caso del mercurio) existe una alta probabilidad de que se asigne una correlación mayor que la real entre dos elementos cuando ambos tienen unos pocos valores superiores concordantes.

Con respecto a las unidades, en todas existe una alta correlación entre mercurio, antimonio y arsénico, sin embargo, en la HBx, Skarn y MMV, las concentraciones absolutas de estos elementos en conjunto no son altas, por ende, sus correlaciones indican minerales de escasa ocurrencia. La correlación entre estos elementos se traduce en la presencia de minerales de la serie tetraedrita-tenantita, en donde el antimonio y el arsénico corresponden a los extremos de la solución sólida (tetraedrita-Sb y tenantita-As), mientras que el mercurio en estado de oxidación Hg^{2+} sustituye al Cu^{2+} en la estructura cristalina (Foit y Hughes, 2004). Las mayores correlaciones entre estos elementos, junto con los mayores promedios absolutos, se encuentran en las unidades MQV, SBx, MSV y MBx.

En la unidad MQV, aparte de la afinidad entre elementos de la tetraedrita-tenantita, existe correlación entre el oro y los elementos componentes de la calcopirita y pirita (Cu, Fe, S), incluyendo el cobalto que puede estar como elemento traza dentro de la pirita (Hawley y Nichol, 1961). Esta correlación podría estar indicando la presencia de oro ocluido dentro de las piritas (Bennet y Benning, 2004) o la precipitación directa de oro nativo junto a la pirita y calcopirita. Por otro lado, el cobre en esta unidad presenta correlación con el grupo señalado y un tanto menor con el antimonio y arsénico, indicando su mayor ocurrencia en la calcopirita y menor en la serie de la tetraedrita-tenantita.

Como se planteó anteriormente, la mayor cantidad de datos se encuentra en la HBx, unidad en la cual se tiene la mejor correlación entre telurio y oro, sumado a una alta concentración de los dos (Tabla 4.7), lo que estaría indicando una residencia mineral casi idéntica. Esta asociación de telurio con oro se encuentra en la calaverita (AuTe_2), mineral reconocido en un estudio de concentrado en el año 2015 (Documento Interno, 2015), año en el cual la mina estaba acotada sólo a la explotación de la brecha hidrotermal (HBx).

Cabe destacar que, en Tambo de Oro, las altas leyes de oro están asociadas a las vetas de cuarzo masivo (MQV) aisladas o incorporadas dentro de la brecha hidrotermal (HBx) (Chávez, 2013), sin embargo, en la actualidad no se hace distinción entre una unidad de brecha con o sin fragmentos de veta de cuarzo. Dicho lo anterior, la HBx presenta variaciones en su composición que afectan el desarrollo del análisis multivariable, generando asociaciones geoquímicas representativas de la población total de sus datos y no específicamente de la mineralización presente.

5.3 Estudio calcográfico

El microscopio electrónico de barrido utilizado en algunos granos tiene un límite de detección de 1000 ppm, lo cual corresponde a un 0,1 % en peso del elemento en el mineral. Esto puede generar una lectura sesgada si algún elemento se encuentra en concentraciones menores a este límite, cómo es el caso de la serie de la tetraedrita-tenantita, en donde el mercurio puede estar presente en concentraciones muy bajas o alcanzar hasta un 12,6 % en peso (Collao, 2006).

El corte pulido corresponde a un tramo menor a 5 centímetros de una muestra que puede alcanzar hasta 1 metro, por ende, la relación entre las concentraciones obtenidas en las muestras de sondaje (Tabla 4.13) con lo observado en los cortes calcográficos es baja, debido a la poca representatividad que tiene este último respecto al tramo total de muestra.

En los cortes se observa que el estilo de mineralización de la tetraedrita es por medio de reemplazo selectivo, tanto en los bordes de granos como en debilidades de la calcopirita. El reemplazo puede ser completo cuando las concentraciones de antimonio y mercurio son elevadas, o puede estar restringido sólo a los márgenes cuando estos elementos están presentes en concentraciones moderadas. De los granos de tetraedrita analizados con microscopio electrónico de barrido, sólo en uno se reconoce mercurio (Figura 4.13) en una concentración de 8,21 % en peso.

La coloradoita observada se presenta tanto en los bordes de granos como en microvetillas de los sulfuros primarios reconocidos como calcopirita y pirita. Además, tal como plantea Paula Cornejo (en edición), la coloradoita se encuentra estrechamente ligado a la precipitación de oro nativo muy puro. Es importante notar que hay una mayor abundancia de este mineral, por sobre la tetraedrita, en la muestra correspondiente a un fragmento de veta de cuarzo masivo (MQV) dentro de la brecha hidrotermal (HBx). Dicho esto, y comparando con las muestras en donde se presenta solamente tetraedrita y no coloradoita, este teluro de mercurio estaría asociado a uno o más pulsos de brecha hidrotermal (HBx) en el depósito.

Estudios en otros depósitos de carácter epitermal revelan que la coloradoita está frecuentemente asociada con Au nativo (Dini y Orlandi, 1995), así como también se ha evidenciado que ocurre junto a otros teluros como la calaverita y petzita (Golding, 1978; Clout, 1989), siendo este último un teluro de oro y plata que no ha sido identificado en Tambo de Oro.

5.4 Estudio de concentrado de planta

Es necesario señalar que las briquetas pulidas se confeccionan a partir de una fracción de muestra de concentrado 10 veces menor que la muestra total enviada a análisis químico ME-MS61, sin embargo, esa fracción se obtiene mediante proceso de homogenización y cuarteo, por ende, su representatividad no se ve comprometida. Además, el material obtenido en la planta corresponde a partículas muy finas (bajo malla 200#), por lo tanto, su homogeneidad ayuda a que la briketa pulida sea lo más representativo posible.

Con respecto a los resultados químicos de las muestras de concentrado, la correlación que se observa entre el mercurio, telurio y oro, junto con las altas concentraciones de estos elementos (Tabla 4.14), indican que las especies coloradoita (HgTe) y calaverita (AuTe_2) podrían estar presentes en el material salido de la planta. Además, estos elementos se encuentran correlacionados en menor medida al hierro, interpretándose esto como una asociación con la pirita, tal como se evidenció en las briquetas pulidas (Figuras 4.14-4.16).

Por otro lado, se tiene una buena correlación entre los elementos que componen minerales de la serie de la tetraedrita-tenantita (sin contar el mercurio), pero con concentraciones relativamente bajas, indicando una escasa aparición de este mineral en el material concentrado.

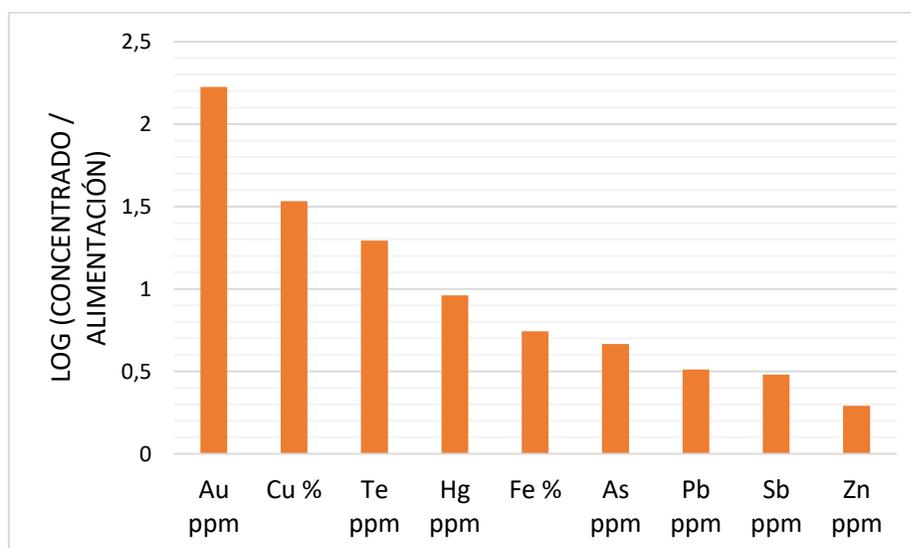


Figura 5.1: Abundancia relativa de elementos entre el concentrado en planta y el material de alimentación.

El proceso de flotación utilizado en la planta concentra principalmente Au, Cu, Te, Hg y Fe, lo que se infiere como una concentración de calcopirita, pirita, oro libre, calaverita y coloradoita. Por otro lado, los elementos que se están depresando en el proceso son el Zn, Sb, Pb y As, elementos asociados a galena, esfalerita y la serie de la tetraedrita-tenantita. Estos últimos se estarían concentrando en los relaves (Figura 5.1).

5.5 Distribución

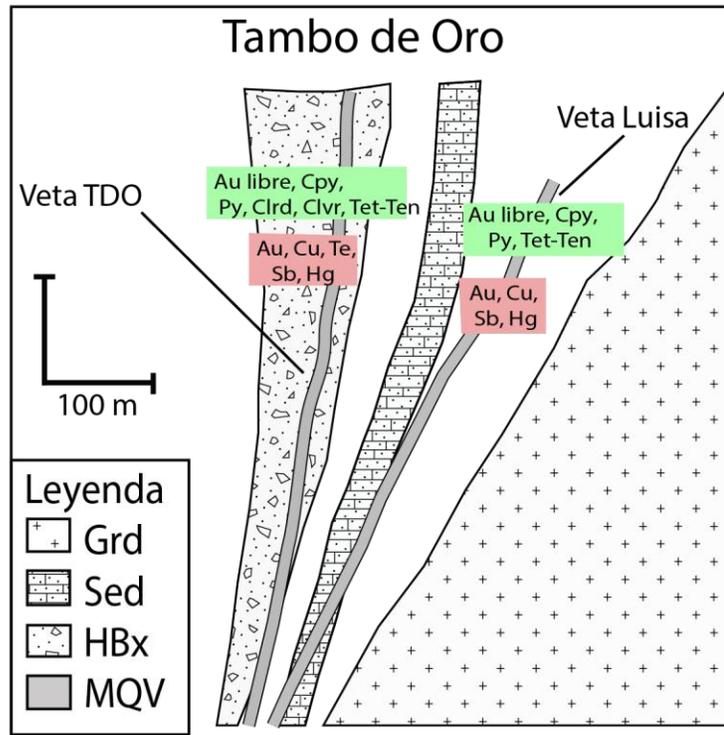
Cabe destacar que el modelo 3D utilizado para desarrollar este capítulo, corresponde a un modelo simplificado de las unidades litológicas y mineralizadas del depósito, por lo que no se recomienda utilizarlo para una posterior estimación de recursos, si no que para visualizar de manera gráfica y tridimensional la distribución de las unidades presentes en el depósito, así como también las zonas en donde hay altas concentraciones de los elementos de interés.

La unidad Ox Fe se modeló utilizando una tendencia estructural hacia el noroeste, basándose en estudios anteriores que indican que la mineralización asociada a óxidos de hierro está relacionada a fallas NW en el depósito (Ormeño *et al.*, 2011 y Sillitoe, 2015), sin embargo, puede haber excepciones causadas por otras estructuras dentro del mismo depósito que no fueron consideradas.

La ley de mercurio utilizada para determinar las zonas en donde el elemento es perjudicial para la producción minera es igual o mayor a 5 ppm, valor que, según documentos internos de la empresa, corresponde a la concentración crítica del material de alimentación a la planta, a partir del cual comienza a verse afectada la posterior venta del producto concentrado. Dicho lo anterior, este valor se considera representativo de la distribución de mercurio que perjudica a la empresa. No así, los valores de antimonio (10 ppm.) y telurio (5 ppm.), los cuales corresponden a concentraciones que indican la posible ocurrencia de minerales portadores de mercurio, pero no afectan directamente a la producción minera de Tambo de Oro.

Cabe destacar que la población de datos de Hg que involucran concentraciones críticas (≤ 5 ppm) es mínima ($< 10\%$) comparado con la población de datos bajo esta concentración. Además, de las poblaciones de Hg definidas en el capítulo 4.2.1, hay una ($0,5 \text{ ppm} < [\text{Hg}] \leq 10 \text{ ppm}$) que involucra valores críticos y no críticos, por lo tanto, la generación de los sólidos puede contener ciertas incongruencias al no tener definidos los límites apropiados de concentraciones.

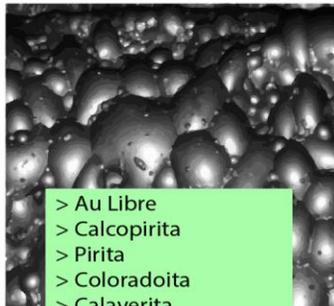
El mercurio y el antimonio dentro del depósito tienen una distribución casi idéntica, por lo que los sólidos generados a partir sus intercepciones tienen un alcance similar al que tienen los elementos por separados. En cuanto al mercurio con el telurio, estos no siguen la misma distribución, si no que el telurio está acotado sólo a la zona de la brecha hidrotermal (HBx). Dicho lo anterior, se infiere que la ocurrencia de minerales de la serie de la tetraedrita-tenantita alcanza sectores en donde no hay ocurrencia de coloradoita, mientras que en los sectores en donde hay coloradoita también hay ocurrencia de la serie tetraedrita-tenantita.



Planta de Flotación

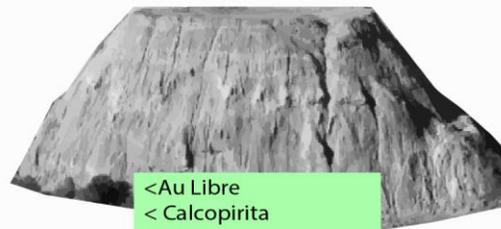


Concentrado



- > Au Libre
- > Calcopirita
- > Pirita
- > Coloradoita
- > Calaverita
- < Tetraedrita-Tenantita

Relave



- < Au Libre
- < Calcopirita
- < Pirita
- < Coloradoita
- < Calaverita
- > Tetraedrita-Tenantita

Figura 5.2: Modelo simplificado del proceso de concentración de planta en Tambo de Oro.

6 Conclusiones

Con los antecedentes expuestos, hay evidencia de que en el depósito Tambo de Oro hay ocurrencia de sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita asociada a los sulfuros hipógenos (pirita y calcopirita), con concentraciones de mercurio que alcanzan los 8,21 % en peso. Estos minerales reemplazan completa o parcialmente a los granos de calcopirita tanto en los bordes como en planos de debilidad, logrando observarse macroscópicamente en algunas muestras con alta concentración de antimonio y mercurio.

Los análisis químicos y mineralógicos también revelan la ocurrencia de coloradoita (HgTe), siendo éste el mayor portador de mercurio en el depósito, alcanzando un 58,45 % en peso del elemento. Esta especie mineral precipita en los márgenes de pirita y calcopirita, y se encuentra muy bien asociado a oro nativo.

El mercurio presente en las sulfosales de la serie de la tetraedrita-tenantita se encuentra como impureza dentro de la estructura cristalina, en su estado de oxidación Hg^{2+} reemplazando al Cu^{2+} (Foit y Hughes, 2004). Para el caso de la coloradoita, el mercurio se encuentra en el mismo estado de oxidación junto al telurio que se presenta en estado Te^{-2} (Greenwood *et al.*, 2012).

A partir de los sólidos de mercurio y antimonio críticos (5 ppm y 10 ppm respectivamente) generados, se determinó que las sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita se pueden encontrar a lo largo de todo el depósito de manera puntual, con una mayor probabilidad de ocurrencia en la zona entre las coordenadas 6584900 N - 6585100 N y 287450 E - 287550 E, y las cotas -100 y 100 m s. n. m. Por otro lado, los sólidos de mercurio y telurio críticos (5 ppm en ambos), indican que la coloradoita presente en Tambo de Oro se encuentra acotada a la zona de la brecha hidrotermal (HBx), en donde además habría ocurrencia de calaverita (AuTe_2).

La planta de flotación genera una concentración de los elementos Cu, Au, Te y Hg en comparación con el Sb y As. Esto, junto con las observaciones mineralógicas realizadas, se traduce en que se está depresando un alto porcentaje de las sulfosales de la serie de la tetraedrita-tenantita durante la flotación, mientras que las especies de telurio presentes en el depósito (coloradoita y calaverita) se están flotando al igual que la pirita y calcopirita. Según lo observado en las briquetas pulidas de concentrado, la coloradoita se mantiene junto a los granos de pirita.

Es altamente recomendable que se realicen trabajos tendientes a determinar el mecanismo para lograr depresar la coloradoita en el proceso de concentración, evitando que se deprese la calaverita. Para lograr esto, es necesario determinar la flotabilidad de las diferentes especies de telurios presentes en el depósito (Yan, 1997) y determinar el comportamiento de concentración y depresado en cada unidad mineralizada en el mismo. Por otro lado, si se desea mejorar aún más la calidad del concentrado obtenido en la planta, se recomienda trabajar en la separación de la tetraedrita de la calcopirita (Byrne *et al.*, 1995).

7 Bibliografía

Adriazola, A., 1997. Relación entre estructura y mineralización en el distrito minero Los Mantos de Punitaqui. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 149p. Santiago, Chile.

Aguirre, L., Egert, E., 1962. Las formaciones manganesíferas de la región de Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. Revista Minerale, No. 76, p. 25- 37. Santiago.

Aguirre, L., Egert, E., 1965. Cuadrángulo Quebrada Marquesa, provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 15:92 p., mapa 1:50.000.

Ardila, R., 1993. Génesis de los yacimientos de cobre tipo skarn en el distrito minero de San Antonio y el yacimiento Panulcillo, IV Región, Chile. Génesis de los yacimientos de cobre tipo skarn en el distrito minero de San Antonio y el yacimiento Panulcillo, IV Región, Chile.

Bennet, A.J., Benning, L.G., 2004. Gold and arsenic interactions with pyrite in hydrothermal solutions. Geochim. Cosmochim. Acta 68, A293-A293.

Bookstrom, A.A., 1977. The magnetite deposits of El Romeral, Chile: Economic Geology, v. 72, p. 1101-1130.

Byrne, M., Grano, S., Ralston, J., & Franco, A., 1995. Process development for the separation of tetrahedrite from chalcopyrite in the Neves-Corvo ore of Somincor SA, Portugal. Minerals engineering, 8(12), 1571-1581.

Caddey S. W. y Brockway, H., 1998. Fracture patterns, tectonic deformation history and formation of Cu - Au - Hg epithermal veins, Punitaqui district, central Chile. Inf. ined. Proyecto FONDEF, 23 p. y figs.

Campos, E., 2014. Termometría de inclusiones fluidas, muestras HMC Resources. Documento Interno HMC Gold. p. 47-52.

Camus, F. 2003. Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. Ed. SERNAGEOMIN, Santiago, Chile. 267 p.

Carballo, H.A., 1979. Cobalto, níquel y zinc en piritas y calcopiritas de algunos yacimientos cupríferos en el norte de Chile. Segundo Congreso Geológico Chileno. Arica.

Chávez, W. X., 2013. Resumen de observaciones y recomendaciones, Distrito Punitaqui, Áreas Tambo de Oro y El Gato, IV Región, Chile. Documento Interno HMC Gold. p. 2-4.

Clarke, F. W., Washington, H. S., 1924. The composition of the earth's crust (Vol. 127). US Government Printing Office. p. 16-34.

- Collao, S., Pavez, H., Sandoval, J., Cristian, S., 2006. Aspectos geometalúrgicos de la tetraedrita-tenantita mercurial del pórfido cuprífero Mina Carmen de Andacollo, IV Región, Chile. *Geología Económica*, Vol. 2. p. 215-218.
- Cornejo, P., 2012. Informe petrográfico y calcográfico. Documento Interno HMC Gold. p. 21-26.
- Dini, A., & Orlandi, P., 1995. Coloradoite (HgTe) from Buca della Vena mine, Apuan Alps, Tuscany, Italy. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie*, 102, 47-50.
- Emparán, C., Pineda, G., 1999. Área Condoriaco – Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. Mapas geológicos, No 12. Santiago.
- Emparán, C., Pineda, G., 2000. Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, 18.
- Emparán, C., Pineda, G., 2006. Geología del Área Andacollo–Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 96(85), 1.
- Emparán, C., Pineda, G., en edición. Geología del área Ovalle-Peña Blanca, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. XXX. XX p. 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- Foit, F. F., Hughes, J. M., 2004. Structural variations in mercurian tetrahedrite. *American Mineralogist*, 89(1), 159-163.
- Frueh, A. J., 1959. The crystallography of petzite, Ag_3AuTe_2 . *American Mineralogist*, 44(7-8), 693-701.
- Gana, P., 1991. Mapa Geológico de la Cordillera de la Costa entre La Serena y Quebrada El Teniente, Región de Coquimbo. SERNAGEOMIN Documentos de Trabajo, N°3, escala 1:100.000. Santiago, Chile.
- Genth, F. A., 1868. Contributions to mineralogy; No. VII. *American Journal of Science*, (135), 305-321.
- Genth, F.A., 1877. Stated meeting, October 20th, 1876. *Proceedings of the American Philosophical Society*: 16: 287-289.
- Geoatacama, 2015. Caracterización mineralógica muestras Tambo de Oro (Punitaqui). Análisis modal y liberación. Departamento de Investigación Mineralógica. Documento Interno HMC Gold. p. 10-15.
- González, G., Rebolledo, A., 2014. Informe de asesoría geológica estructural en Mantos de Oro, Distrito Punitaqui, Chile. Documento Interno HMC Gold. p. 21- 26.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A., 2012. *Chemistry of the Elements*. Elsevier. Ch 13, p. 747-786.

- Hawley, J., Nichol, I., 1961. Trace elements in pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite of different ores. *Eco.Geol.* 36, p. 467-487.
- Higuera, P., Oyarzun, R., Oyarzún, J., Maturana, H., Lillo, J., & Morata, D. (2004). Environmental assessment of copper–gold–mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Applied Geochemistry*, 19 (11), 1855-1864.
- Higuera, P., Oyarzún, R., Oyarzún, J., Marurana, H., Esbrí, J.M., Lillo, J., Morata, D., 2015. Ambiente, M. Mercurio en Chile: problemática y trabajos realizados por el GEMM sobre este tema. p. 359-362
- Jorquera Villarroel, M., 2015. Método de explotación Bench & Fill y su aplicación en minera Michilla. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134586>.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F., 2007. Metallic ore deposits. In *The Geology of Chile* (Gibbons, W. and Moreno, T. editors). The Geological Society Special Publication: 179-199, London.
- Nekrasov, I. Y., 1996. *Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits*. CRC Press. p. 217-263.
- Ormeño, A., Pino, H., Sellés, D., 2011. Estudio geológico-metalogénico proyecto Tambo de Oro. Aurum Consultores. Documento Interno HMC Gold. p. 20-49, 63-79.
- Oyarzún, J., Oyarzún R., Pavicic, S., 2001. Estudio prospectivo en un distrito de Cu-Au-Hg asociado a zona de cizalla: Punitaqui, Chile. *Boletín del Instituto Tecnológico Geominero de España* 112, 75-84.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R., Oyarzún, J., 1996. The manto-type gold deposits of Andacollo (Chile) revisited: a model based on fluid inclusion and geological evidence. *Economic Geology* 91, 1298-1309.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R., Oyarzún, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita* 33, 547-559.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Hervé, M., Puig, A., 1985. Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°S. *Revista Geológica de Chile*, N°24, 63-74.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., 1991. Hoja Illapel. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. *Carta Geológica de Chile*, Escala 1, 250.
- Ruiz F., Aguirre, L., Corvalán, J., Klohn, C., Klohn, E., Levi, B., 1965. *Geología y yacimientos metalíferos de Chile: Chile*, Inst. Inv. Geol. [Santiago]
- Sierra, MJ., Millán, R., López, F., Alguacil, F., Cañadas, I., 2016. Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 4898-4907.

Sillitoe, R. H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38, p. 787-812.

Sillitoe, R. H., 2015. Comments on geology and exploration of the Tambo de Oro deposit and environs, Punitaqui District, Chile. Documento Interno HMC Gold. p. 7-9.

Taylor, S. R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et cosmochimica acta*, 28(8), 1273-1285.

Thomas, H., 1967. Geología de la Hoja Ovalle y Carta Geológica (1:250.000). Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N°23, 58p. Santiago, Chile.

Tobbey, E., 2010. Activity Report for Stratoni Resources. Documento Interno HMC Gold. p. 4-7.

UNEP, 2014. Implementación del Convenio de Minamata sobre el Mercurio en el período de transición hasta su entrada en vigor. XIX Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, Los Cabos, México. p. 1-8.

Yan, D. S., 1997. Selective flotation of pyrite and gold tellurides. *Minerals engineering*, 10(3), 327-337.

8 Anexos

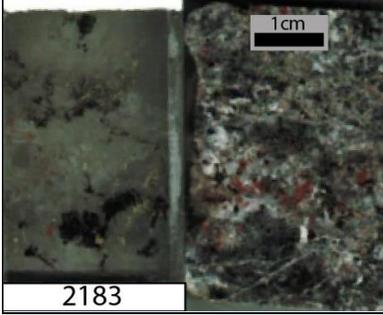
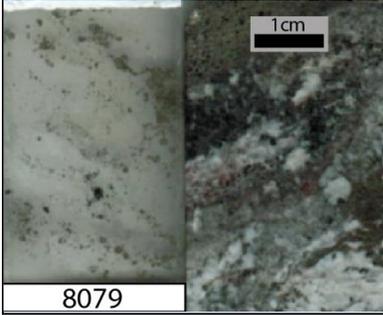
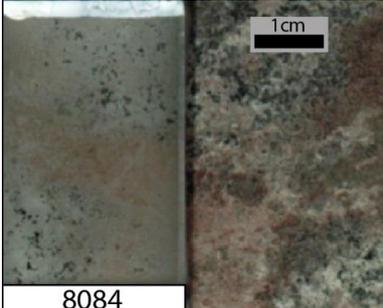
8.1 Minerales importantes en el estudio.

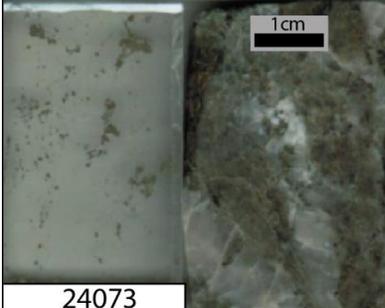
Mineral	Fórmula Química	Densidad [g/cm ³]
Coloradoita	HgTe (<i>Genth, 1877</i>)	8,1
Tetraedrita-Tenantita	(Cu,Fe,Hg,Zn) ₆ (Cu,Ag) ₆ (Sb,As) ₄ S ₁₃ (<i>Foit y Hughes, 2004</i>)	4,6 - 5,2
Calaverita	AuTe ₂ (<i>Genth, 1868</i>)	9,31
Petzita	Ag ₃ AuTe ₂ (<i>Frueh, 1959</i>)	8,7 - 9,14

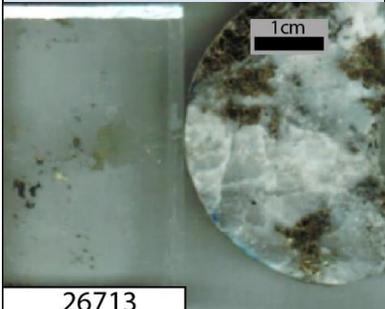
8.2 Características de minerales portadores de mercurio en Tambo de Oro.

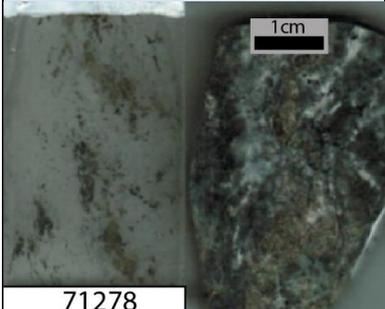
Características macroscópicas		
	Coloradoita	Tetraedrita - Tenantita
Clivaje	No presenta	No presenta
Color	Negro grisáceo (Superficies frescas presentan color Bronce deslustrado)	Gris acero
Raya	Negra	Negra
Densidad	8,1	4,9
Fractura	Concoidal	Superficies planas irregulares
Dureza	3,5 - 4	2,5 (Uña)
Características ópticas		
	Coloradoita	Tetraedrita - Tenantita
Color	Blanco con un ligero tinte marrón	Grisáceo que tiende a marrón oliva
Pleocroismo	No presenta	No presenta
Anisotropía	Debil (Rojo pardusco oscuro a gris azulado)	No presenta
Reflectividad	Moderadamente alta (35 - 38 %)	Moderadamente baja (30 - 33 %)

8.3 Muestras calcográficas.

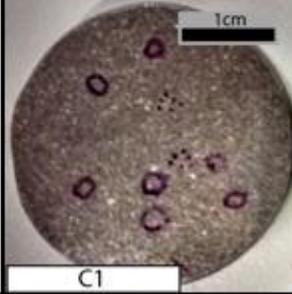
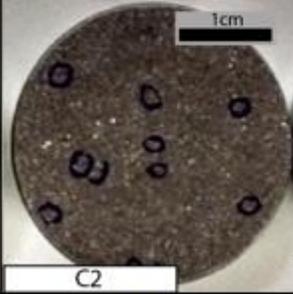
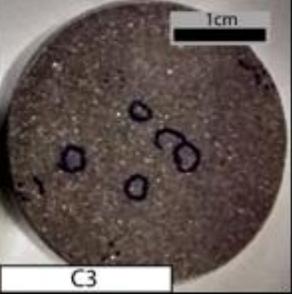
<p style="text-align: center;">2183</p>  <p style="text-align: center;">2183</p>	<p>Corresponde a la unidad de Skarn (Skn). Consiste en un marmol mineralizado y deformado con botroides de calcedonia (flint nodules), con bandas tectonizadas y mineralizadas de mushketovita con clorita, sericita, escaso cuarzo y sulfuros con inclusiones de anhidritas (Cornejo, en edición). Presenta mineralización de hematita-mushketovita (7%) con granos de 0,5-3 mm y agregados de calcopirita (5%) junto a pirita (3%) (ambos > 0,4 mm). Se observa un leve reemplazo en los bordes de grano de calcopirita por sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita (0,4%). Además, Cornejo (en edición) identificó coloradoita junto a oro nativo en esta muestra (trazas).</p>
<p style="text-align: center;">8079</p>  <p style="text-align: center;">8079</p>	<p>Corresponde a la unidad de Skarn (Skn). Roca foliada "brechizada" con bandas de cuarzo deformado, carbonatos, rosetas de clorita ferrosa, con mineralización de hematita- mushketovita y zonas de sulfuros macizos (Cornejo, en edición). Presenta mineralización de pirita maciza con granos de 0,5-1 mm (7%) y cúmulos de hematita-mushketovita-magnetita (5%) de tamaño variable entre 0,5-2mm. También se observan granos de calcopirita (4%) siendo reemplazados parcialmente por sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita (1%). En esta muestra se ha reconocido también cinabrio en trazas dentro de cristales de calcopirita (Cornejo, en edición).</p>
<p style="text-align: center;">8084</p>  <p style="text-align: center;">8084</p>	<p>Corresponde a la unidad de Skarn (Skn). Roca carbonatada con calcita, sericita, clorita y apatito, y una red discontinua de cuarzo con rosetas de clorita ferrosa, asociada a abundante especularita y cinabrio intersticial rojo (Cornejo, en edición). Presenta mineralización de pirita (3%) con granos de 0,1-0,5mm rodeados por agregados de especularita (5%) de tamaño 0,2-1mm. Se observa leve ocurrencia de calcopirita y cinabrio. La calcopirita es reemplazada parcialmente por sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita (0,1%) en los bordes de granos.</p>

<h1>24073</h1>	<p>Corresponde a una veta masiva de cuarzo (MQV). Milonita de protolito igneo (diorita cuarcífera) con abundante rutilo residual y circones accesorios y vetas deformadas de cuarzo con calcita y sulfuros (Cornejo, en edición).</p> <p>Presenta mineralización diseminada de pirita maciza (7%) de tamaño 0,5-1mm con inclusiones de coloradoita y oro nativo (trazas ambos). También contiene una leve mineralización de calcopirita (0,5%) parcialmente reemplazada por sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita (trazas).</p>
	
24073	

<h1>26713</h1>	<p>Corresponde a una veta masiva de cuarzo (MQV) dentro de la brecha hidrotermal (HBx).</p> <p>Veta de cuarzo gruesa con sericita intersticial y grandes cúmulos de sulfuros (Cornejo, en edición).</p> <p>Presenta abundante mineralización de pirita (5%) y calcopirita (7%) precipitada en márgenes de granos de cuarzo. Los bordes de granos de calcopirita son levemente reemplazados por sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita (0,5%). Además, se observa abundante coloradoita (1%) precipitada junto a oro nativo en los márgenes de los granos de pirita y calcopirita.</p>
	
26713	

<h1>71278</h1>	<p>Corresponde a una veta de cuarzo masiva (MQV).</p> <p>Veta de cuarzo deformada y microbrechizada, con abundancia de sulfuros asociada a ganga de sericita "foliada" con carbonatos (Cornejo, en edición).</p> <p>Presenta abundante mineralización de agregados cristalinos de pirita (12%) con menor calcopirita (3%). Los granos de calcopirita en esta muestra son altamente reemplazados por sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita, alcanzando estos últimos un mayor porcentaje de ocurrencia (5%). En esta muestra no se observa coloradoita.</p>
	
71278	

8.5 Muestras de concentrado.

	C1	C2	C3
			
Especie Mineral	%	%	%
Pirita	75	75	66
Calcopirita	20	23	30
Bornita	0,1	0,1	0,1
Hematita	0,3	0,4	0,3
Magnetita	0,2	0,1	0,1
Tetraedrita-Tenantita	0,2	1	0,3
Coloradoita	5	1	4

8.6 Muestra macroscópica de tetraedrita en Tambo de Oro.

