



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**Geoquímica de elementos estratégicos en el sector Hacienda
Toledo/Sierra Monardes, Región de Atacama.**

Jorge Félix Cabrera Rasjido

Copiapó, Chile 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**Geoquímica de elementos estratégicos en el sector Hacienda
Toledo/Sierra Monardes, Región de Atacama.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Geólogo

Profesor guía: Dr. Wolfgang Griem

Profesor co-guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Jorge Félix Cabrera Rasjido

Copiapó, Chile 2022

El presente trabajo de titulación se desarrolló en el marco del proyecto FIC-FNDR 2018 denominado "Núcleo de investigación del cobalto y tierras raras", financiado por el Gobierno Regional de Atacama y sus Fondos para la Innovación y Competitividad (FIC).



Agradecimientos

En primer lugar mis agradecimientos van a mi familia, las personas más importantes en mi vida. Para mi mamá Natalia y mi papá Jorge, quienes han sido el pilar fundamental en todos los avances y logros que he alcanzado, para mi hermana Daniela quien me acompañó en esta aventura de ir a la universidad en una ciudad desconocida para ambos, eres mi compañera de aventuras bacanes en la vida. Los quiero mucho y podría llenar mil hojas agradeciendo todo lo que me han dado pero va a quedar muy largo así que lo resumiré en un muchas gracias por todo lo pasado y por todo lo que viene.

También agradezco a los amigos que encontré durante este tiempo en la universidad, a Catalina, Nicole, Jean Pierre, Vanessa, Nadhiesca, Hernán (Pato), Marco y Renato. Gracias por todas esas juntas llenas de risas, las amanecidas haciendo trabajos y todas las cosas que vivimos juntos. Sin duda esta experiencia fue mucho más alegre y entretenida gracias a ustedes.

Por último, agradezco a todos los profesores que entregaron sus conocimientos de esta hermosa ciencia que es la geología.

Resumen

Dado el continuo y veloz desarrollo tecnológico que vive la humanidad en este tiempo, surge la necesidad de encontrar fuentes capaces de proveer las materias primas necesarias para la construcción de equipos tecnológicos. Elementos como cobalto, litio, níquel, tierras raras, entre otros, cumplen un rol clave en las nuevas tecnologías desarrolladas. Debido a esto la mayor parte de los países industrializados realizan estudios para clasificar estos elementos bajo la denominación de elementos estratégicos y/o críticos en base a variables como la importancia económica y disponibilidad de los mismos. Estos elementos se presentan en distintos tipos de depósitos minerales como menas primarias o secundarias. Dentro de los depósitos minerales donde es posible encontrar estos elementos destacan los depósitos IOCG o IOA caracterizados por contener menas de óxidos de hierro, cobre, oro y otros elementos en concentraciones traza (Co, Ni, tierras raras, U). En Chile los depósitos IOCG e IOA se encuentran agrupados en la llamada Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa de edad Jurásico-Cretácico temprano. Los depósitos ubicados en las cercanías del sector Hacienda Toledo/Sierra Monardes (comuna Copiapó, Región de Atacama) se encuentran agrupados espacialmente dentro de esta franja, por lo cual, el objetivo de este estudio es establecer a través de análisis de fluorescencia de rayos X en rocas extraídas desde estos depósitos si existen concentraciones anómalas de elementos clasificados como estratégicos. En ese contexto, los resultados obtenidos señalan la presencia a nivel traza de al menos seis elementos clasificados como estratégicos (bismuto, cobalto, manganeso, níquel, vanadio e itrio), distribuidos heterogéneamente en los 11 sectores muestreados en la zona de estudio. Destacando los sectores 1 y 6 por sus altos contenidos en cobalto, con valores de mediana de 1210 y 2000 partes por millón respectivamente. Además, resaltan los altos contenidos de vanadio en el sector 1 con un valor de mediana de 1120 partes por millón y en el sector 8 con un valor de mediana de 725 partes por millón. A nivel general en la zona de estudio, las concentraciones de cobalto, níquel y bismuto alcanzan valores de mediana de 1270, 200 y 210 partes por millón respectivamente. Estos elementos se encuentran hospedados en las menas principales de los cuerpos mineralizados, las cuales corresponden a minerales óxidos de hierro (magnetita y hematita), y minerales de cobre (crisocola, atacamita y malaquita). Adicionalmente, en el caso de elementos como el bismuto y cobalto presentan una estrecha correlación con el alto contenido de hierro en las muestras analizadas. El origen de estos elementos estratégicos es atribuible a fluidos hidrotermales generados por el emplazamiento de cuerpos magmáticos ígneos correspondientes a los plutones Sierra Chicharra y Diorita La Brea ocurridos durante el Cretácico inferior entre los 132-119 millones de años, los cuales circularon en estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, pertenecientes al Sistema de Fallas Atacama.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Contexto de la investigación.....	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5 Área de estudio, ubicación y accesos	3
1.6 Estudios previos	4
Capítulo 2: Marco Teórico	5
2.1 Elementos estratégicos	5
2.1.1 Definiciones y generalidades	5
2.1.2 Bismuto.....	8
2.1.3 Cobalto.....	10
2.1.4 Manganeso	12
2.1.5 Vanadio.....	15
2.1.6 Tierras raras	18
2.2 Depósitos tipo IOCG-IOA.....	22
2.2.1 Depósitos IOCG-IOA en Chile.....	27
2.3 Geología regional	28
2.4 Geología local.....	30
2.4.1 Rocas estratificadas.....	30
2.4.2 Rocas intrusivas	30
Capítulo 3: Metodología	32
3.1 Etapa de pre-terreno.....	32
3.2 Etapa de terreno	32
3.3 Etapa de post-terreno	33
Capítulo 4: Resultados	35
4.1 Geología de las zonas mineralizadas	35
4.1.1 Sector 1	36
4.1.2 Sector 2	37
4.1.3 Sector 3	38
4.1.4 Sectores 4 y 5	40

4.1.5 Sector 6	41
4.1.6 Sector 7	42
4.1.7 Sector 8	43
4.1.8 Sector 10	43
4.1.9 Sector 11	45
4.1.10 Sector 13	46
4.2 Geoquímica de elementos estratégicos.....	47
4.3 Correlación entre elementos	55
Capítulo 5: Discusión.....	60
5.1 Análisis e interpretación a nivel general de la zona de estudio.....	60
5.2 Análisis e interpretación por sector de la zona de estudio.....	61
5.3 Análisis de correlaciones.....	65
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones.....	67
6.1 Conclusiones.....	67
6.2 Recomendaciones	68
Referencias.....	69
Anexo: Datos geoquímicos	76

Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto de la investigación

El acelerado desarrollo de nuevas tecnologías ha generado una fuerte demanda a nivel mundial por elementos “no convencionales” dentro de los cuales destacan el cobalto, manganeso, níquel, tierras raras, elementos del grupo platino, entre otros. Estos elementos son vitales por ejemplo en la construcción de naves espaciales, generación y almacenamiento de energía, o incluso artefactos comunes en la vida humana como celulares o televisores. Yañez et al., (2021) explican que las principales economías del mundo han listado estos elementos con el motivo de asegurar su suministro denominándolos como elementos críticos o estratégicos en base a variadas metodologías. Estos elementos se encuentran distribuidos de manera irregular en el mundo y en su mayoría se encuentran como subproductos de menas principales, por esto los países generan estudios de ellos en base a sus necesidades económicas y de consumo (ver fig. N°1.1).

Chile es reconocido por ser uno de los mayores productores y exportadores de Cobre a nivel mundial, según el Sernageomin (2020) en el año 2020 Chile aportó con el 28,5% de la producción mundial de este metal, en tanto la USGS (2021) señala que durante los años 2016-2019, el 59% del cobre refinado provino desde este país. Esta condición se ha mantenido al menos durante los últimos 40 años (ver fig. N°1.2) sin embargo, la producción de otros elementos que son de gran importancia a nivel mundial en Chile es escasa o nula en comparación al cobre. Recientemente estudios realizados por Townley et al., (2017) y Cifuentes (2019) señalan que en Chile existen variados depósitos con concentraciones potencialmente explotables de cobalto, manganeso, tierras raras, entre otros, clasificados como elementos críticos o estratégicos por países como China, Estados Unidos y la Unión Europea. Los depósitos indicados en estos estudios se ubican principalmente en la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa y son definidos como depósitos tipo IOCG e IOA según varios autores (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Groves et al., 2010) quienes también hacen énfasis en que además de las menas principales (cobre, óxidos de hierro, oro), poseen una gran variedad de otros elementos económicamente importantes.

Los depósitos ubicados en los alrededores de la Hacienda Toledo/Sierra Monardes (comuna Copiapó, Región de Atacama) se encuentran agrupados espacialmente dentro de la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa y presentan características similares a los depósitos IOCG e IOA. Por tanto, es necesario estudiar sus rasgos geológicos para finalmente evaluar si estos depósitos pueden constituirse como una potencial fuente de elementos estratégicos y/o críticos.

1.3 Objetivo general

Evaluar la ocurrencia y potencial económico de elementos estratégicos en el sector de Hacienda Toledo/Sierra Monardes.

1.4 Objetivos específicos

- Definir la ocurrencia y geometría de las zonas mineralizadas en el sector Hacienda Toledo/Sierra Monardes
- Identificar y caracterizar litología y alteración en el sector Hacienda Toledo/Sierra Monardes
- Identificar elementos estratégicos y establecer sus concentraciones

1.5 Área de estudio, ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en los alrededores del sector Hacienda Toledo (ver fig. N°1.3), la cual está localizada en la Región de Atacama, aproximadamente a 5 kilómetros al oeste de la ciudad de Copiapó. Al área se accede tomando la ruta 5 hacia el norte, para luego desviarse hacia el sur por la ruta C-386 conocida como “bypass” Copiapó.

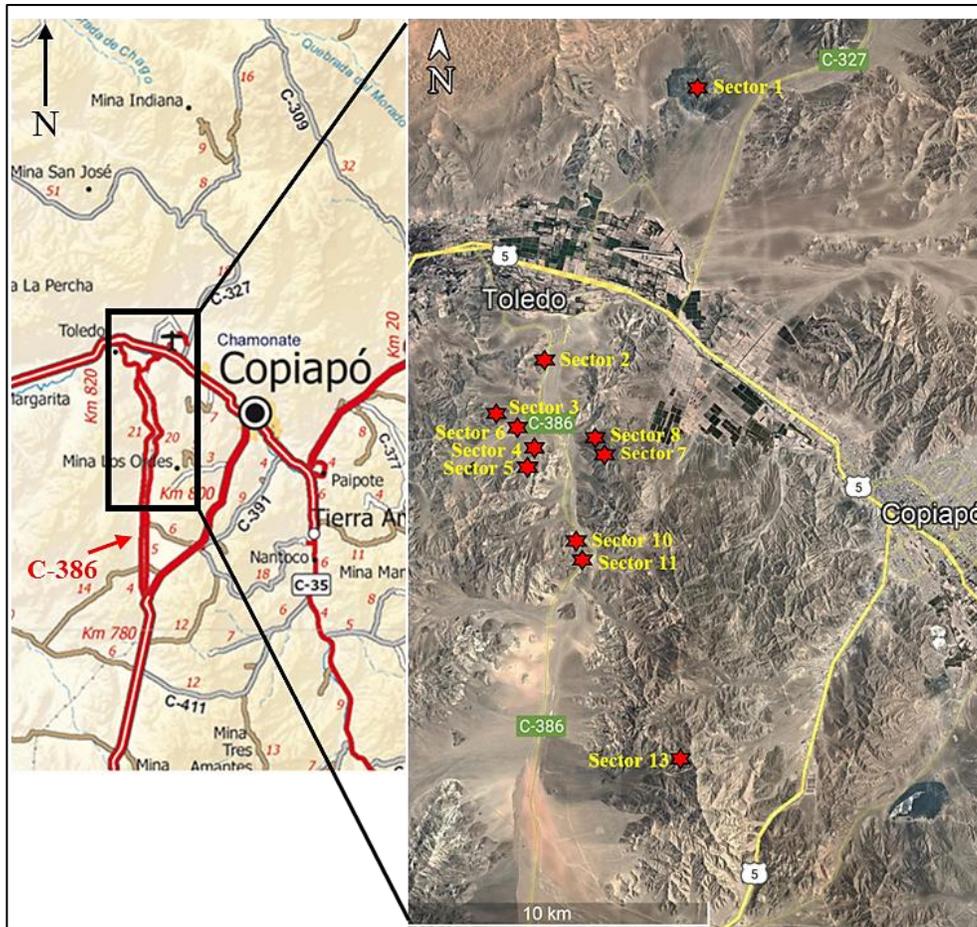


Figura N°1.3: Ubicación de la zona de estudio resaltando los sectores de extracción de muestras. Extraído y modificado de Mop (2016) y Google Earth.

1.6 Estudios previos

Henríquez (1978) sugiere la posibilidad de aportar un valor agregado a los yacimientos de la Franja Ferrífera de Chile a través de la recuperación de subproductos, entre ellos el Co, Ni, U, Ti, Cr, entre otros.

Vivallo et al., (1998) estudia la génesis de yacimientos estratoligados y vetiformes de Cu ubicados en la Cordillera de la Costa en la Región de Antofagasta, encontrando concentraciones anómalas de Co-Ni y Tierras Raras.

Lacassie (2015) realiza un análisis estadístico de muestras obtenidas desde yacimientos minerales ubicados en las Regiones de Atacama y Coquimbo, en el cual se observa que las concentraciones de Co-Ni y Tierras raras se asocia con los yacimientos de tipo IOCG-IOA de la Cordillera de la Costa.

Townley (2017) a través de estudios realizados en distintos mineros de la Franja Ferrífera de la Región de Atacama y Región de Coquimbo sugiere la existencia de concentraciones anómalas de Co, Mn y Tierras raras, las cuales pueden ser explotables en algunos casos.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Elementos estratégicos

2.1.1 Definiciones y generalidades

Una de las primeras apariciones del concepto de elementos estratégicos ocurre el año 1939, fue en este año cuando Estados Unidos promulga su Ley de Materiales Estratégicos y Críticos. Según indica Delgado (2010), el objetivo de esta ley es contar con un stock de materiales claves para una posible emergencia nacional, esta clasificación se basó en características tales como su dificultad en sustitución y disponibilidad en riesgo por temas políticos, sociales o ambientales. Dicho concepto tiende a estar relacionado a términos bélicos ya que algunos de los elementos dentro de esta clasificación sirven como material base de explosivos o vehículos de guerra. Por ejemplo, Clark y Reddy (1989) definen como materiales o metales estratégicos aquellos que tienen alto riesgo de sufrir inconvenientes en abastecimiento y son que importantes en la defensa del país. También Evans (2009) indica que están asociados casi exclusivamente con la seguridad nacional y necesidades militares.

Sin embargo, otros autores como Zappettini (2021), señalan que estos elementos son esenciales para las tecnologías modernas, industria, medicina, defensa y construcción, aunque su suministro puede estar limitado y/o sujeto a interrupciones. Además Bauer et al., (2011) concluye que el uso de estos elementos no está restringido solamente a un enfoque bélico sino también a sus aplicaciones en energías limpias tales como turbinas eólicas, automóviles eléctricos y paneles solares, pero el suministro de estos elementos puede sufrir problemas a corto plazo.

Un concepto similar al de elementos estratégicos es el de elementos críticos, estos conceptos tienden a ser utilizados como sinónimos. En este sentido, Regueiro (2014) resalta que un elemento crítico puede ser o no estratégico mientras que uno estratégico siempre será crítico. También menciona que un elemento estratégico es aquel o aquellos en los que se debe desarrollar una estrategia para el abastecimiento mientras que un elemento crítico impacta de gran manera a la economía de un país. Los factores claves que se utilizan para clasificar si un elemento es crítico o estratégico son la importancia económica y su disponibilidad o el riesgo de suministro como se ilustra en la figura N°2.1. Otros factores que se toman en cuenta son la estabilidad política del país que provee el elemento, potencial de sustitución del elemento y efectos que podría tener en el medio ambiente. Tomando en cuenta estas definiciones, las aplicaciones de un elemento estratégico ya no solo se limitan a la defensa de un país, sino que también juegan un rol clave en economía, desarrollo de tecnologías, medicina y energías renovables. Aun así, no existe un consenso generalizado en la clasificación final de si un elemento es estratégico o crítico, ya que cada país utiliza una metodología distinta para determinar qué valor se le asigna (Regueiro, 2014; Andersson, 2020; Zappettini 2021).

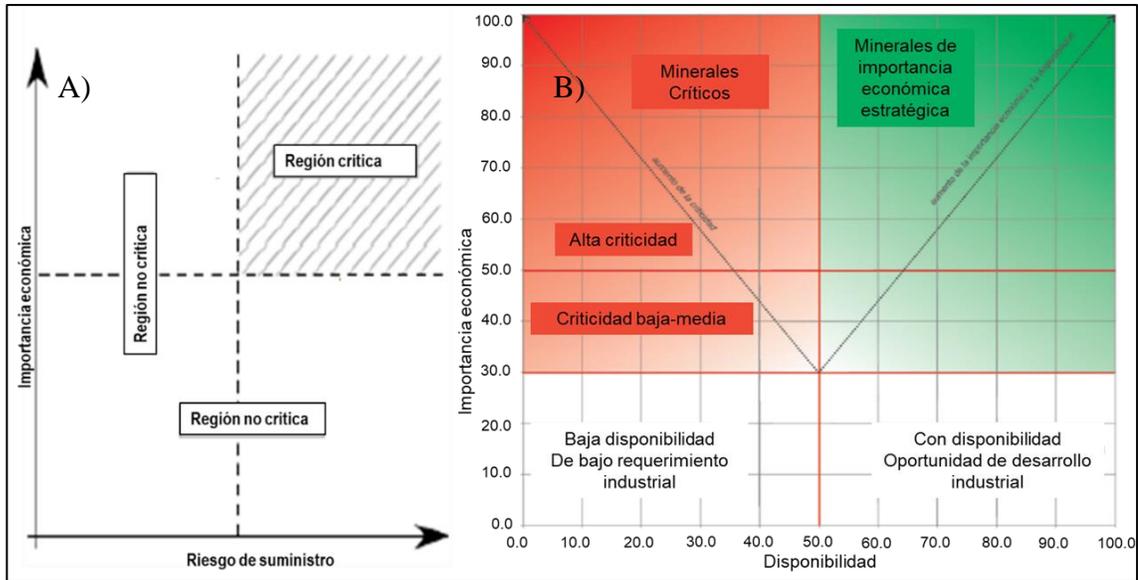


Figura N°2.1: Gráficos utilizados como metodología para clasificación crítica o estratégica de elementos o minerales. A) Gráfico de clasificación de elementos críticos en Europa. Extraído y modificado de Regueiro (2014). B) Gráfico de clasificación de minerales o elementos críticos y estratégicos. Extraído y modificado de Zappettini (2021).

La fig.N°2.2 ilustra el cambio en consideración de que elementos son de carácter estratégico en Estados Unidos durante el paso desde el año 2010 al 2011, en esta se aprecia que se agregan elementos como el Manganeso y Níquel. La tabla N°2.1 resume algunos elementos considerados como estratégicos y/o críticos en distintos países.

Figura N°2.2: Elementos estratégicos en Estados Unidos en el año 2010 (imagen superior) y 2011 (imagen inferior). Extraído y modificado de Bauer et al. (2010 y 2011).

	Elementos
Argentina (Zappetini 2021)	Be, Co, Cr, Cu, Ge, Li, Mn, Grupo platino, Tierras raras
Chile (Cifuentes 2019)*	Co, Li, Mo, Re, Tierras raras,
China (Andersson 2020)	Al, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mo, Sb, W, Tierras raras
Estados Unidos (Bauer et al 2011)	Co, Ga, In, Li, Mn, Te, Y, Tierras raras
Perú (Acosta 2016)	Bi, Cd, Fe, Hg, Mo, Sb, Se, W, V, Tierras raras
Unión Europea (European commission 2020)	Al, Ba, Be, Bi, Co, Ga, Li, Mg, W, Grupo platino, Tierras raras

Tabla N°2.1: Tabla indicando elementos de carácter estratégico y/o críticos en distintos países (Elaboración propia. Fuentes citadas en tabla). *En el caso de Chile los elementos señalados no clasifican como estratégicos y/o críticos sino como de importancia económica para el país.

A continuación, en base a lo resumido en la tabla N°2.1 se describen rasgos importantes de algunos elementos que podrían ser considerados como estratégicos y/o críticos para el país.

2.1.2 Bismuto

El Bismuto (Bi) es un metal calcófilo muy frágil de brillo metálico rosado. Ocurre naturalmente en minerales llamados bismutinita (Bi_2S_3), bismutita ($\text{Bi}_2\text{O}_2(\text{CO}_3)$) y bismita (Bi_2O_3), aunque también es posible encontrarlo en estado nativo (European commission, 2020). El contenido promedio de bismuto de la corteza terrestre se estima en 0,1 partes por millón (ppm), y rara vez se presenta en concentraciones suficientes para permitir la recuperación comercial como producto primario. Por lo general, se recupera como subproducto durante el procesamiento de minerales de otros metales, principalmente plomo y tungsteno (Carlin, 2013).

Según datos de la USGS (2021) entre los años 2016-2019 países como China, Corea del sur, México y Bélgica concentraron el 94% de la producción mundial de este metal siendo China su máximo productor (alrededor del 80% de la producción mundial), las reservas del bismuto son estimadas a través de las reservas de plomo, ya que es producido en su mayoría como subproducto de este. La mina “Tasna” en Bolivia y una mina ubicada en China son los únicos yacimientos donde se ha explotado bismuto como el producto primario. La mina “Tasna” ha estado inactiva desde 1996 (USGS, 2019).

Con respecto a los depósitos y/o rocas donde es posible encontrar este metal, Carlin (2013) indica que la abundancia más alta se encuentra en nódulos de manganeso oceánicos, donde su concentración varía entre 0,5-24 ppm, en segundo orden se encuentra en rocas silíceas donde oscila entre 0,02- 0,9 ppm. Por otro lado, Ridley (2013) señala que es posible encontrar concentraciones económicamente rentables de bismuto en campos de venas y vetas hidrotermales polimetálicas, siempre asociada a otros elementos tales como uranio, plata, oro, hierro, plomo, entre otros. Edwards y Atkinson (1986) dan cuenta de depósitos tipo skarn de molibdeno ubicados en Marruecos en los que se extrae bismutinita además de minerales de cobre, plomo y hierro como subproductos. Reedman (1979) advierte que existen pocos estudios respecto a la geoquímica del bismuto, sin embargo menciona que puede tener valor como mineral indicador en la búsqueda de depósitos de oro. Esto es confirmado por Thompson et al., (1999) quien estudia la correlación entre bismuto, tungsteno y arsénico con oro en siete depósitos ubicados en distintos países concluyendo que el bismuto es el metal que mejor se correlaciona con el oro en la mayoría de los depósitos.

En Chile la información con respecto al bismuto es escasa, Oyarzun et al., (1991) en su estudio relacionado a la distribución de metales (Bi, Co, Ni, entre otros) presentes como subproductos en menas cupríferas, encuentra valores anómalos de bismuto (ver fig. N°2.3) entre los 29°30’-31°00’S. Además de esto Singerling (2017) muestra que existió una dinámica de importaciones y exportaciones durante los años 2016-2017 entre Chile y Estados Unidos. Sin embargo, no se especifica desde que yacimientos o plantas

metalúrgicas provenía este metal (ver fig. N°2.4) donde también ilustra que durante el año 2017 Estados Unidos dejó de importar este metal desde Chile.

Sus usos son principalmente en el campo de la medicina, así lo detalla Carlin (2013), quien menciona que sus compuestos fueron utilizados en heridas y llagas, posteriormente se descubrió su eficacia para el desarrollo de medicamentos utilizados en el tratamiento de dolores estomacales, además de ser material base para algunos cosméticos y pigmentos reemplazando al cadmio. Klopogge et al. (2020) detallan que este metal es empleado en aleaciones con otros metales para la confección de utensilios de alimento, mecanismos de rociadores contra incendios, balas, cañas de pescar, donde destaca que es capaz de reemplazar al plomo como material base de estos implementos ya que es un metal considerado no tóxico y poseen una densidad similar por lo que estos no perderían su consistencia.

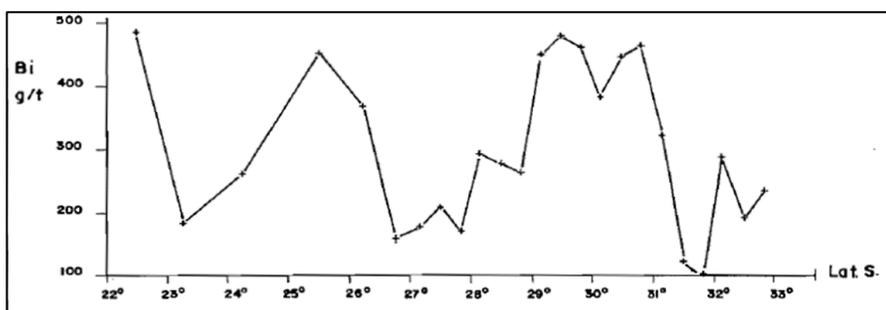


Figura N°2.3: Distribución de la concentración de bismuto entre las latitudes 22°-33° en menas cupríferas de Chile. Extraído desde Oyarzun et al., (1991).

IMPORTACIONES ESTADOUNIDENSES DE BISMUTO METÁLICO, ALEACIONES, DESECHOS Y CHATARRA.				
País o localidad	2016		2017	
	Cantidad (Kilogramos)	Valor (Miles)	Cantidad (Kilogramos)	Valor (Miles)
Austria	--	--	122	\$5
Belgium	130,000	\$1,330	141,000	1,650
Bolivia	--	--	60,100	630
Canada	6,210	194	10,100	277
Chile	20,000	202	--	--
China	1,800,000	17,400	2,210,000	22,100

EXPORTACIONES ESTADOUNIDENSES DE BISMUTO METÁLICO, ALEACIONES, DESECHOS Y CHATARRA.				
País o localidad	2016		2017	
	Cantidad (Kilogramos)	Valor (Miles)	Cantidad (Kilogramos)	Valor (Miles)
Argentina	141	\$20	2,240	\$23
Belgium	6,500	373	17,600	224
Bolivia	440	6	442	5
Brazil	8,500	109	19,700	229
Canada	18,000	174	34,000	432
Chile	866	7	1,560	14
China	37,400	449	13,800	338

Figura N°2.4: Datos de importación y exportación de bismuto en Estados Unidos durante los años 2016-2017 (valor en dólares). Extraído y modificado de Singerling (2017).

2.1.3 Cobalto

El cobalto es un metal gris plateado brillante con aplicaciones diversas debido a sus propiedades únicas. Es un metal duro que conserva su resistencia a altas temperaturas, tiene un alto punto de fusión, es ferromagnético manteniendo sus propiedades magnéticas a la temperatura más alta de cualquier otro metal, es capaz de formar aleaciones con otros metales otorgando resistencia a altas temperaturas y mayor resistencia al desgaste, es vital como elemento traza en los organismos vivos (European commission, 2020). Smith (2001) expone que su concentración total en la corteza terrestre es de 25 ppm y se han reconocido al menos treinta y cuatro variedades de minerales principalmente sulfuros, selénidos, sulfatos y carbonatos.

Datos de la USGS (2021) señalan a la República democrática del Congo como el país con la mayor producción mundial de este metal (alrededor del 70%) y además de poseer las mayores reservas mundiales. Se estima que las reservas mundiales son alrededor de 7.1 millones de toneladas en las cuales Congo, Australia y Cuba poseen el 50%, 19% y 7% respectivamente. Este producto es recuperado como subproducto de la minería de cobre y níquel, solamente en depósitos ubicados en Congo y Marruecos es extraído como la mena principal.

Según Hitzman et al., (2017) los contenidos más altos de cobalto ocurren en rocas ultramáficas (alrededor de 110 ppm.) y en segundo orden en rocas ígneas máficas (cercano a 47 ppm.), también señala que existen una variedad de depósitos donde se puede encontrar este elemento los cuales se pueden agrupar en cuatro tipos, coincidiendo con el estudio de Smith (2001) quien igualmente sugiere cuatro orígenes geológicos para las mineralizaciones de cobalto (Ver fig. N°2.5). Los tipos de depósitos son:

- Estratoligados
- Magmáticos
- Lateríticos
- Otros

En los depósitos estratoligados destacan los ubicados en República del Congo y República de Zambia conocidos como el Cinturón de cobre Centrafricano, estos se encuentran alojados en sedimentos del Precámbrico y presentan concentraciones que varían desde 0,17-0,25% de cobalto (generalmente carrolita (CuCo_2S_4)) acompañado de minerales de cobre. Respecto a los depósitos de origen magmático están ubicados principalmente en Canadá, China y Australia, el cobalto es extraído como subproducto de menas sulfuro de Ni-Cu y grupo platino en intrusiones o flujos volcánicos ultramáficos, en este caso las leyes de cobalto son mucho más variadas distribuidas en rangos entre 0,01-0,21%. Por otro lado los depósitos lateríticos se ubican principalmente en Cuba, Brasil y Nueva Caledonia estos depósitos fueron formados por la meteorización de rocas ultramáficas en ambientes tropicales que movilizaron metales como Ni-Co concentrándolos en sucesiones sedimentarias de potencias que van entre 10-40 metros. Las leyes de estos depósitos van desde 0,04-0,22%. Por último ambos autores agrupan bajo la denominación de “otros” a

depósitos de origen hidrotermal que pueden contener concentraciones variables de cobalto asociado a otros metales, los depósitos destacados son óxidos de hierro cobre y oro (IOCG), vetas polimetálicas (Ag-Ni-Co-As-Bi), sulfuros masivos volcanogénicos (VMS), entre otros, en estos casos siempre es recuperado como subproducto o incluso su producción es nula. Otra potencial fuente de cobalto se encuentra en el océano, Hein y Petersen (2013 y 2013a) evidencian que cortezas ferromagnesianas ricas en cobalto precipitadas en los flancos de montes submarinos en rangos de 1-260 milímetros podrían concentrar entre 0,5-0,8% de cobalto, además de nódulos formados por la concreción de manganeso y óxidos de hierro en ambientes abisales pueden contener hasta 0,5% de cobalto por lo cual serían de un gran interés económico.

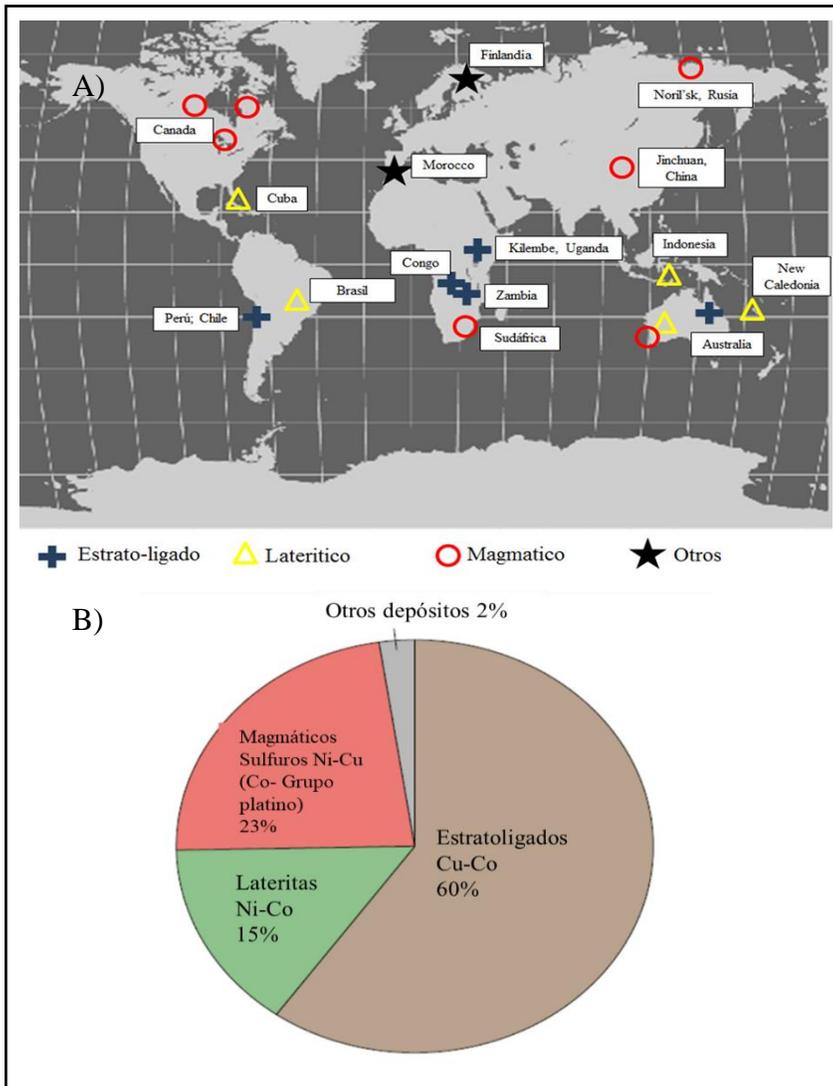


Figura N°2.5: Imagen de los orígenes geológicos del cobalto. A) Distribución mundial y tipos de depósitos de cobalto. Extraído y modificado de Smith (2001). B) Gráfico circular mostrando porcentajes de los tipos depósitos de cobalto encontrados a nivel mundial. Extraído y modificado de Hitzman et al. (2017).

Townley et al., (2017) explica en su investigación que en Chile el cobalto fue explotado como mena principal hasta el año 1944 en yacimientos ubicados las regiones de Atacama y Coquimbo entre los cuales destacan los distritos San Juan y Tambillos. Estos yacimientos se encuentran dentro de la Franja Ferrífera de Chile ubicada en la provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa. La mineralización se presenta en cuerpos con formas de vetas, brechas y mantos emplazados en rocas metamórficas, volcánicas, intrusivas y sedimentarias. En el distrito San Juan las leyes medias de cobalto alcanzan hasta un 1,6% mientras que en distrito Tambillos las leyes medias llegan a 1%. También insinúa el potencial de los depósitos tipo IOCG en la producción de cobalto como subproducto.

Los usos y aplicaciones del cobalto datan desde hace más de 4000 años, Hawkins (2001) detalla que este metal era usado principalmente como un pigmento para dar color azul a vidrios, en épocas más recientes sus aplicaciones son variadas, por ejemplo en el ámbito de la metalurgia se utiliza para confeccionar superaleaciones de Ni-Co-Fe, aleaciones resistentes a la corrosión y a temperaturas altas. Otros campos de aplicación son en el desarrollo de electrónicos, materiales magnéticos, químicos y cerámicos. Kloprogge et al., (2020) destaca que este metal puede ser utilizado en conjunto con litio para el desarrollo de baterías de larga duración y baterías recargables para autos eléctricos y además para el desarrollo de prótesis ortopédicas. La figura N°2.6 resume los usos y aplicaciones del cobalto en el año en la Unión Europea durante el 2015.

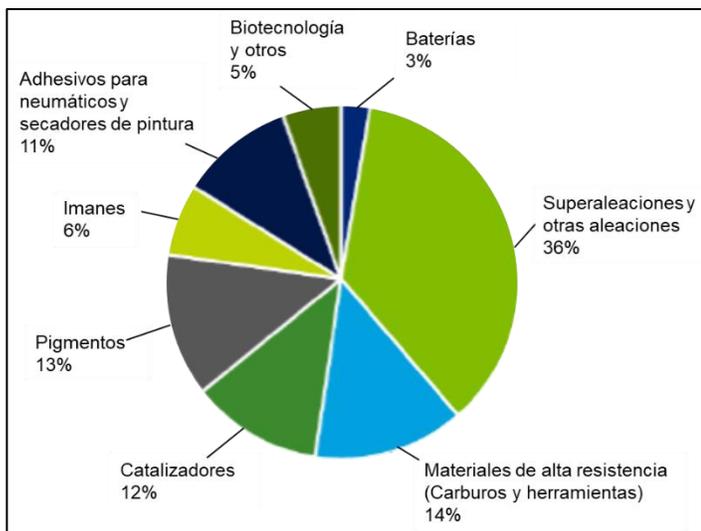


Figura N°2.6: Gráfico ilustrando usos y aplicaciones de cobalto durante el año 2015 en la Unión Europea. Extraído y modificado de European commission (2020).

2.1.4 Manganeso

El manganeso, que es un metal ferroso, es un elemento insustituible en las economías industriales modernas y es consumido en grandes cantidades por todas las naciones industrializadas (Cannon et al., 2017). Kloprogge et al., (2020) indica que este metal

ocurre principalmente en su estado oxidado conocido como pirolusita (MnO_2) aunque también es posible encontrarlo en otras combinaciones formando silicatos, hidróxidos, carbonatos, entre otros. Además establece que es el doceavo elemento más abundante en la corteza terrestre con una concentración de alrededor de 0,1%, Ridley (2013) señala más precisamente que el contenido en la corteza terrestre es de 950 ppm.

En Estados Unidos se hace la distinción entre dos tipos de manganeso importado según revela Cannon et al., (2017) el primero llamado “mena de manganeso” se refiere al metal mínimamente procesado o casi en su estado natural, mientras que el segundo tipo de manganeso importado son aleaciones llamadas “ferromanganeso” y “silicomanganeso” los cuales son producto de la refinación de las menas naturales. Datos de la USGS (2021) muestran que en el periodo ocurrido entre los años 2016-2019 los principales países exportadores de “mena de manganeso” fueron Gabón (69%) y Sudáfrica (17%). Por otro lado, en el mismo periodo de tiempo los mayores productores de “ferromanganeso” fueron Australia (21%) y Sudáfrica (21%) en tanto para el caso de “silicomanganeso” Georgia (26%) y Sudáfrica (22%) se cuentan como los mayores productores. Además se estima que las reservas mundiales de manganeso son de 1.3 millones de toneladas de las cuales Sudáfrica cuenta con el 40% de estas.

La clasificación de depósitos de manganeso es diversa dependiendo del autor, Rodriguez et al., (2005) presenta dos tipos de clasificación, la primera de ellas corresponde a una “clasificación genética” (resumida en la tabla N°2.2) basada en las características genéticas de los depósitos, en tanto la segunda es llamada “clasificación litológica”, basada principalmente en las características petrográficas de la roca de caja en la cual se presentan al menos doce categorías de depósitos descritos en distintas publicaciones.

Depósitos	Sedimentarios	Hidrotermales	Metamorfizados	Intemperismo
Características	Acumulación de manganeso en cuencas sedimentarias producto de procesos erosivos y diagénesis.	Formados por soluciones hidrotermales ricas en manganeso, dispuestas en vetas, stockworks y brechas.	Resultado de metamorfismo regional o de contacto en secuencias sedimentarias previamente mineralizadas con manganeso.	Acumulaciones residuales o formadas por infiltración en climas tropicales.
Ejemplos de depósitos	Nikopol (Ucrania) Chiatura (Georgia)	Mina Quinto (Cuba) Mina El Gavilán (México)	Postmasbury (Sudáfrica)	Nódulos de Fe-Mn producidos en suelos.

Tabla N°2.2: Tabla resumiendo tipos de depósitos correspondientes a la “clasificación genética”.
Elaboración propia. Fuente: Rodriguez et al. (2005).

Por otro lado Cannon et al., (2017) propone clasificarlos bajo criterios de posición continental o marina, separándolos así en depósitos terrestres y depósitos marinos. Sin embargo advierte que su clasificación al ser más simple excluye una gran variedad de

otros depósitos debido a que son pequeños en tamaño (ver fig. N°2.7). Respecto a los depósitos terrestres explica que es posible subdividirlos en dos categorías:

- Depósitos de manganeso en rocas sedimentarias marinas
- Depósitos de enriquecimiento secundario (Supérgeños)

Los depósitos de manganeso en rocas sedimentarias marinas corresponden a extensas capas mineralizadas con manganeso, algunas formadas hace 2500 millones de años, originalmente formadas en ambientes marinos que pasaron a formar parte de la corteza continental a través de procesos de alzamiento y acreción continental. Asociado a la mineralización de manganeso se encuentra una concentración considerable de hierro la cual puede estar presente en la capa mineralizada de manganeso o en capas intercaladas. Una compilación reciente de la composición química de los depósitos sedimentarios de manganeso del mundo indica que la ley promedio de manganeso es de alrededor del 24 % y el contenido de hierro es del 4,3 % (Maynard, 2010). Los depósitos de enriquecimiento secundario o supérgeños fueron formados por procesos químicos que ocurrieron dentro de las zonas mineralizadas redistribuyendo y reconcentrando el manganeso, estos depósitos son típicos de regiones tropicales y a pesar de ser más pequeños en tamaño pueden presentar leyes que superan a los depósitos descritos anteriormente.

En relación a los depósitos marinos el estudio de Cannon et al., (2017) coincide con Hein y Petersen (2013 y 2013a) en que nódulos y cortezas ferromagnesianas formadas en ambientes marinos profundos concentran valores económicamente rentables de manganeso y otros metales como bismuto, cobalto, níquel, tierras raras, entre otros. Sin embargo, advierte que probablemente el manganeso sea recuperado como subproducto de otros metales económicamente más interesantes.

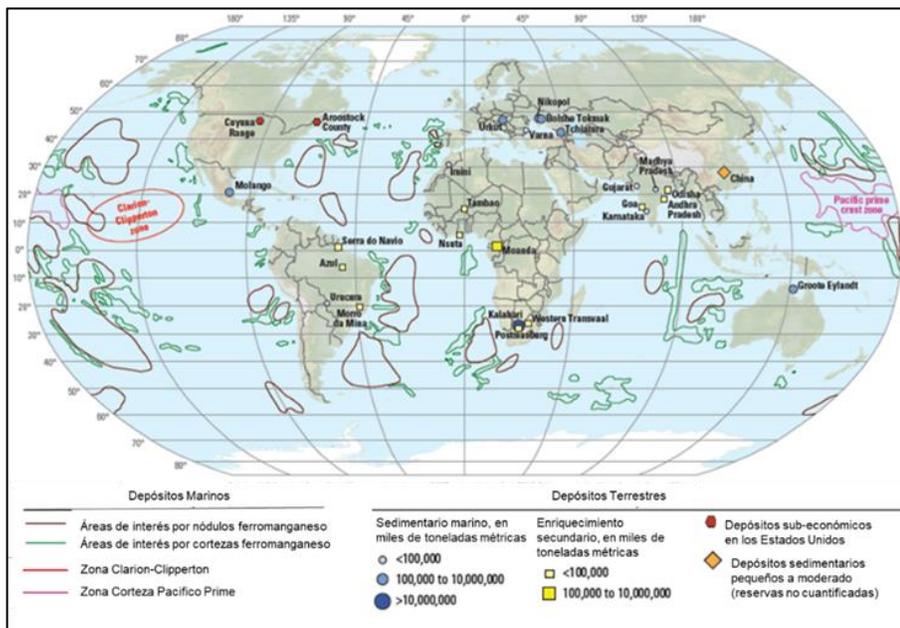


Figura N°2.7: Mapa mundial mostrando ubicación, tamaño relativo, y tipos de depósitos de manganeso. Extraído y modificado de Cannon et al. (2017).

Respecto a la explotación de manganeso en Chile Townley et al., (2017) menciona que los yacimientos más importantes se encuentran principalmente en la región de Coquimbo y en menor medida en la región de Atacama. Los distritos más relevantes son Corral Quemado, Arrayán y Fragua en la región de Coquimbo, mientras que en la región de Atacama se señala a Sierra La Bandera. Estos yacimientos corresponden a depósitos mantiformes de origen sedimentario-volcánico desarrollados durante el Jurásico superior y Cretácico inferior. A pesar de lo mencionado se advierte que la explotación de manganeso no ha sido de gran relevancia en la economía chilena, incluso el Sernageomin (2020) informa que desde el 2009 hasta la actualidad no se registra producción de este metal.

En cuanto a los usos y aplicaciones del manganeso Klopogge et al., (2020) puntualiza en que es demasiado frágil para ser utilizado como un metal puro. Por otro lado, Tolcin (2017) remarca que es esencial para la producción de hierro y acero, ya que es capaz de eliminar los óxidos en metal fundido y mejora propiedades como la dureza y resistencia mecánica a las aleaciones. Cannon et al., (2017) establecen que es un elemento clave en la industria metalúrgica y no hay otros elementos que puedan substituir las características que otorga en la preparación de hierro y acero, además menciona que las aplicaciones no se reducen solo al ámbito de la metalurgia sino que también es utilizado en la producción de cátodos de baterías, aditivos y micronutrientes en alimento de animales y fertilizantes, productos químicos para el tratamiento de agua, entre otros usos.

2.1.5 Vanadio

Klopogge et al., (2020) señala al vanadio como el veintavo elemento más abundante en la corteza terrestre, aunque es muy raro encontrarlo en su estado nativo en la naturaleza. Su concentración en la corteza terrestre tiene variados valores dependiendo del autor, por ejemplo Reedman (1979) establece una concentración de 110 ppm., Taylor y McLennan (1995) señalan que su abundancia es aproximadamente 60 ppm., mientras que Ridley (2013) alude a una concentración de 135 ppm. El vanadio se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles, la extracción de minerales y actividades industriales de alta temperatura, incluido el refinado del acero y el procesamiento de minerales de fosfato (Kelley et al., 2017).

La USGS (2019) estima que las reservas mundiales de vanadio exceden las 63 millones de toneladas sin embargo, al ser recuperado como un subproducto de elementos como hierro o uranio este valor podría estar subestimado. Casi la mitad de estas reservas están ubicadas en China y un cuarto en Rusia, otros países con reservas de vanadio son Australia y Sudáfrica (European commission, 2020). Datos de la USGS (2021) señalan que en el periodo 2019-2020 China, Rusia y Sudáfrica concentran un 92% de la producción mundial de este metal.

Kelley et al., (2017) establecen que existen cuatro tipos de depósitos principales con concentraciones económicas de vanadio, además se presenta en depósitos magmáticos-hidrotermales en concentraciones menores y por último se menciona a los combustibles

fósiles como otra fuente de vanadio (ver fig. N°2.8). Los principales depósitos se presentan a continuación:

- Depósitos de titanomagnetita vanadíferas: Consisten en acumulaciones magmáticas de magnetita e ilmenita, definidas arbitrariamente al poseer más de 1% de rutilo (Fischer, 1975). Kelley et al., (2017) explican que estos depósitos están alojados principalmente en rocas ígneas ultramáficas comúnmente anortositas y gabros que ocurren en formas tabulares, estratiformes o lenticulares como sills o lacolitos. Reynolds (1985) indica que comúnmente contienen una ley entre 0,2-1% de V_2O_5 , aunque hay zonas que superan el 1,5% además los designa como la mayor fuente de vanadio a nivel mundial. Los depósitos destacados incluyen el Complejo Bushveld en Sudáfrica, Panzhihua en China, Macizo Kachkanar en Rusia, entre otros.
- Depósitos de vanadio alojados en areniscas: Formados por enriquecimiento de vanadio y uranio en cuerpos lenticulares alojados paralelos a estratificaciones de areniscas en ambientes fluviales. Shawe (2011) expone que las concentraciones de vanadio (V_2O_5) son de 1% generalmente pero en algunos depósitos alcanzan y superan el 2,5%. Estos depósitos han sido identificados en Estados Unidos en su mayoría aunque también existen casos en Argentina y Kazajistán.
- Depósitos de vanadio alojados en lutitas: Kelley et al., (2017) describe que estos depósitos ocurren en sucesiones marinas que incluyen un amplio rango de rocas carbonatadas y lutitas de grano fino con materia orgánica que se depositaron en ambientes marinos pelágicos y márgenes continentales. Las concentraciones de V_2O_5 usualmente son de 0,18% y pueden alcanzar valores de 1,7% además se encuentran otros metales valiosos como cobre, molibdeno uranio, entre otros, sin embargo se advierte que a pesar de ser reconocido su potencial por concentración de vanadio estos depósitos no han sido explotados.
- Depósitos de vanadatos: Los vanadatos de plomo, zinc y cobre se forman en las zonas de oxidación de depósitos de metales comunes, especialmente en áreas de clima árido y oxidación intensa (Fischer, 1975a). Kelley et al., (2017) propone que estos depósitos son acumulaciones secundarias generadas por procesos supérgenos (oxidación por interacción con aguas meteóricas). El depósito más destacado en esta clasificación es el Otavi Mountainland ubicado en Namibia aunque existen casos similares descritos en Argentina, México y Estados Unidos.

Respecto a las fuentes de vanadio en depósitos magmáticos-hidrotermales se mencionan una serie de depósitos, por ejemplo, depósitos tipo Kiruna, pórfidos cupríferos, epitermales oro-plata, entre otros, los cuales según Kelley et al., (2017) presentan concentraciones anómalas sin embargo no son de gran potencial económico y por tanto no serían consideradas como fuentes importantes a futuro.

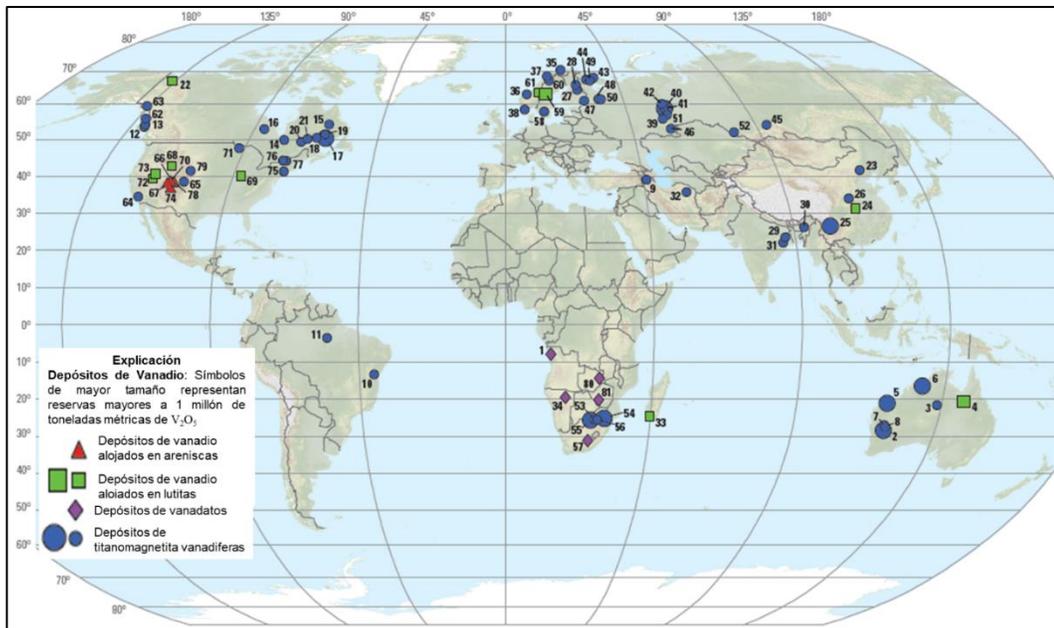


Figura N°2.8: Mapa mundial mostrando ubicación y tipos de depósitos de vanadio. Extraído y modificado de Kelley et al. (2017).

En Chile la mayor cantidad de estudios relacionados al vanadio se han llevado a cabo en la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa, Henríquez (1978) sugiere en su estudio la posibilidad de recuperar este metal como subproducto en la explotación de yacimientos de hierro, según su descripción este metal puede estar dentro de la estructura de magnetitas y apatitos dado su similar radio iónico. Elgueta (1991) en su estudio realizado en el distrito minero El Romeral (región de Coquimbo) concluye que el vanadio está genéticamente ligado al hierro y se posiciona en su estructura molecular, además se presenta en leyes que varían entre 0,2-0,7% de vanadio. Otros estudios relacionados a la geoquímica de yacimientos de hierro (Vivallo et al. 1995, Marschik y Fontboté, 2001, Munizaga y Lagos 2015) mencionan concentraciones variables de vanadio, sin embargo no se profundiza en su importancia económica o si es rentable su recuperación.

Los usos y aplicaciones del vanadio son casi en su totalidad para conformar aleaciones, así lo confirma Klopproge et al., (2020) quien señala que alrededor del 85% del vanadio total producido es utilizado como ferrovanadio o como aditivo en aleaciones dado que una de sus características es aumentar la dureza del metal, además informa que existen distintos tipos de aleaciones en base al contenido de vanadio que está presente en el producto final. Los aceros de alta resistencia y bajo de aleación que contienen vanadio se utilizan ampliamente para la construcción de partes de autos, edificios, puentes, grúas, tuberías, vagones de ferrocarril, barcos y carrocerías de camiones (Polyak, 2012). Kepley et al., (2017) advierte que el rol del vanadio es irremplazable en las aleaciones vanadio-titanio-aluminio utilizadas en la construcción de naves espaciales, por otro lado sus aplicaciones no relacionadas a la industria metalúrgica incluyen la conformación de cerámicos, catalizadores y químicos. Polyak (2017) destaca que el vanadio está siendo

utilizado en el desarrollo de baterías recargables, conocidas como baterías de flujo redox de vanadio, aportando al avance en tecnologías verdes.

2.1.6 Tierras raras

Las tierras raras son 15 elementos que comprenden que varían en número atómico de 57 (lantano) a 71 (lutecio); se les conoce comúnmente como los lantánidos (Van Gosen et al., 2017). Chakhmouradian y Wall (2012) explican que a este grupo también se suma el itrio (Y) ya que sus características físicas y químicas son similares a las otras Tierras raras, pero el escandio (Sc) es excluido debido a que su radio iónico es pequeño en comparación a los otros elementos de este grupo. Schüller, et al., (2011) por otro lado si incluye al escandio en la clasificación, además expone que este grupo es subdividido en “Tierras raras pesadas” y “Tierras raras livianas” en base a su peso atómico, sin embargo advierte que no existe una definición aceptada mundialmente de que elemento pertenece a cuál grupo incluso otros autores proponen una tercera clasificación con el nombre de Tierras raras medias (por ejemplo Hatch 2012). Dicho problema genera clasificaciones arbitrarias de algunos elementos.

La fig. N°2.9 resume los elementos agrupados a excepción del escandio (Sc), el cual no es considerado en el grupo de las tierras raras por el autor, y el Prometeo (Pm) debido a que es raro de encontrar de manera natural. En el caso del itrio es encasillado en las tierras raras pesadas debido a que tiene mayor afinidad con los elementos de este grupo. También se encuentra un listado de minerales conformados por estos elementos.

Elemento	Símbolo	Numero atómico	Peso atómico	Abundancia en Corteza (partes por millón)	Grupo	Mineral	Fórmula química
Tierras raras livianas					Carbonatos	Bastnasita	(Ce, La)(CO ₃)F
Lantano	La	57	138.91	39		Parisita	Ca(Ce,La) ₂ (CO ₃) ₂ F ₂
Cerio	Ce	58	140.12	66.5		Cebaita	Ba ₃ (Ce,Nd) ₂ (CO ₃) ₅ F ₂
Praseodimio	Pr	59	140.91	9.2		Huanghoita	Ba(Ce, La, Nb)(CO ₃) ₂ F
Neodimio	Nd	60	144.24	41.5	Fosfatos	Monacita	(Ce, La, Nd, Th)PO ₄
Samarium	Sm	62	150.36	7.05		Xenotima	YPO ₄
Europio	Eu	63	151.96	2.0		Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)
Gadolinio	Gd	64	157.25	6.2		Silicatos	Cerita
Tierras raras pesadas					Gadolinita		(Ce, La, Nd,Y) ₂ FeBe ₂ [O SiO ₄] ₂
Itrio	Y	39	88.91	33	Allanita		(Ca,Ln) ₂ (Al,Fe) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
Terbio	Tb	65	158.92	1.2	Óxidos		Euxenita
Disprosio	Dy	66	162.50	5.2		Loparita	(Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe)O ₃
Holmio	Ho	67	164.93	1.3			
Erbio	Er	68	167.26	3.5			
Tulio	Tm	69	168.93	0.52			
Iterbio	Yb	70	173.04	3.2			
Lutecio	Lu	71	174.97	0.8			

Figura N°2.9: Imagen izquierda corresponde a listado de tierras raras encontradas en depósitos minerales. Extraído y modificado de Van Gosen et al. (2017). Imagen derecha corresponde a minerales conformados por elementos clasificados como Tierras raras. Extraído de COCHILCO (2016).

Datos de la USGS (2021) perfilan a China como el máximo productor mundial de estos elementos concentrando un 59% de la producción entre los años 2019-2020 (producción podría ser incluso mayor), sumado a esto se estima que las reservas son de al menos 44

millones de toneladas. A pesar de estos datos según la EC (European comisión, 2021) la producción de tierras raras por parte de China es compleja de entender debido a que no se incluyen todos los antecedentes necesarios para calcular los valores correctamente. Gambogi (2017) indica que otros países como Australia, Brasil y Vietnam son productores de tierras raras en cantidades menores y también poseen reservas en proporciones considerables.

Chakhmouradian y Wall (2012) señalan que el termino tierras raras podría ser una denominación incorrecta ya que no todos los elementos agrupados bajo esta denominación son tan raros en la corteza terrestre. Cerio e itrio, por ejemplo, son los elementos 25 y 30 más abundantes en la corteza terrestre respectivamente, muy superior en concentración a estaño, mercurio, molibdeno, y todos los metales preciosos (Rudnick and Gao 2003). Van Gosen et al., (2017) manifiesta que las tierras raras ocurren en diversos tipos de depósitos, a pesar de esto no siempre se encuentran en concentraciones económicas, en vista de lo dicho expone que los depósitos económicos o con potencial económico son los siguientes:

- Carbonatitas: Las carbonatitas son rocas ígneas poco comunes derivadas de magmas ricos en carbonatos en contraste a las rocas ricas en sílice (SiO_2) y se caracterizan, además, por ser ricas en tierras raras livianas. En estas rocas, los carbonatos, principalmente calcita y dolomita, corresponden a más del 50% de la composición de las rocas. El principal mineral contenedor de tierras raras presente es la bastnasita (Cochilco, 2016). Van Gosen et al., (2017) detalla que este tipo de depósitos ha sido la principal fuente de tierras raras livianas desde 1960 donde destacan depósitos ubicados en China (Bayan Obo, Maoniuping), Estados Unidos (Sulphide Queen) y Australia (Mount Weld).
- Sistemas ígneos peralcalinos: Las rocas ígneas alcalinas están conformadas por un grupo de rocas que generalmente son empobrecidas en SiO_2 respecto a Na_2O , K_2O y CaO . En tanto las rocas peralcalinas son una subclase de las rocas alcalinas definidas como aquellas en las que la proporción molecular de $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (Van Gosen et al., 2017). Según explican Castor y Hedrick (2006) estos depósitos contienen una gran concentración de tierras raras pesadas sin embargo son de leyes relativamente bajas por lo que solo un depósito ubicado en Rusia (Macizo Lovozero) ha sido explotado.
- Cuerpos magmáticos de magnetita-hematita: Corresponden a zonas mineralizadas con magnetita, hematita, martita y apatito alojados en cuerpos magmáticos máficos a félsicos en los cuales existe contenido de tierras raras para ser extraído como subproducto del hierro. Long (2011) destaca depósitos ubicados en Estados Unidos como aquellos que tienen potencial en este ámbito (Distritos ferríferos Pea Ridge y Mineville).
- Depósitos Óxidos de hierro cobre y oro (IOCG): Sillitoe (2003) explica que estos depósitos de origen hidrotermal son un clan amplio y mal definido que son agrupados por su alto contenido en magnetita y/o hematita en conjunto con minerales de cobre y oro. A diferencia de los depósitos señalados en el punto anterior, el contenido en oro y cobre son la principal diferencia según explica Van

Gosen et al., (2017) en relación a las tierras raras la concentración y variedad de ocurrencia en estos depósitos es muy amplia, siendo identificadas en el depósito Olympic Dam ocurriendo en conjunto con cuerpos de óxidos de hierro, sin embargo estos no han sido explotados aún.

- Acumulación de monacita-xenotima en gneises máficos: Este tipo de depósitos según expone Van Gosen et al., (2017) se encuentran enriquecidos en tierras raras pesadas, motivo por el cual no son fuente importante para la explotación, sin embargo sugiere que podrían ser económicamente rentables en el futuro.
- Depósitos de arcillas iónicas: Corresponden a grandes depósitos de arcillas con bajas concentraciones de tierras raras (0,04-0,25%) que se forman en zonas tropicales con precipitaciones medias a altas. El proceso de formación de estos yacimientos comienza con la meteorización de granitos, dando origen a suelos ricos en arcillas sobre el granito. A la vez, las aguas subterráneas lixivian los elementos de tierras raras de las rocas graníticas, las movilizan, hasta que se fijan débilmente, por adsorción iónica, a las arcillas formadas (Cochilco, 2016). Liang et al., (2014) y Van gosen et al., (2017) destacan que estos son el tipo de depósito más importante y económicamente rentables en China por cuatro motivos principales: (1) Facilidad en la recuperación al aplicar ácidos débiles en las arcillas. (2) Depósitos enriquecidos en tierras raras pesadas de alto valor. (3) Bajo costo operacional y (4) Bajo impacto ambiental.
- Depósitos placer conteniendo monacita-xenotima: Corresponden a depósitos de playa actuales o antiguos en los que los minerales pesados fueron mecánicamente separados y acumulados. Los minerales de mena son la monacita y, en menor medida, xenotima, los cuales generalmente se recuperan como subproducto de la extracción de minerales pesados como ilmenita, rutilo y circón. Estos yacimientos son fuente de tierras raras livianas y torio (Cochilco, 2016). Van Gosen et al., (2017) reporta que su relevancia fue mayor en la década de los 60 pero fue decayendo debido al descubrimiento de depósitos más rentables (Mountain Pass).

La figura N°2.10 ilustra la ubicación de los depósitos y proyectos de tierras raras más conocidos a nivel mundial.

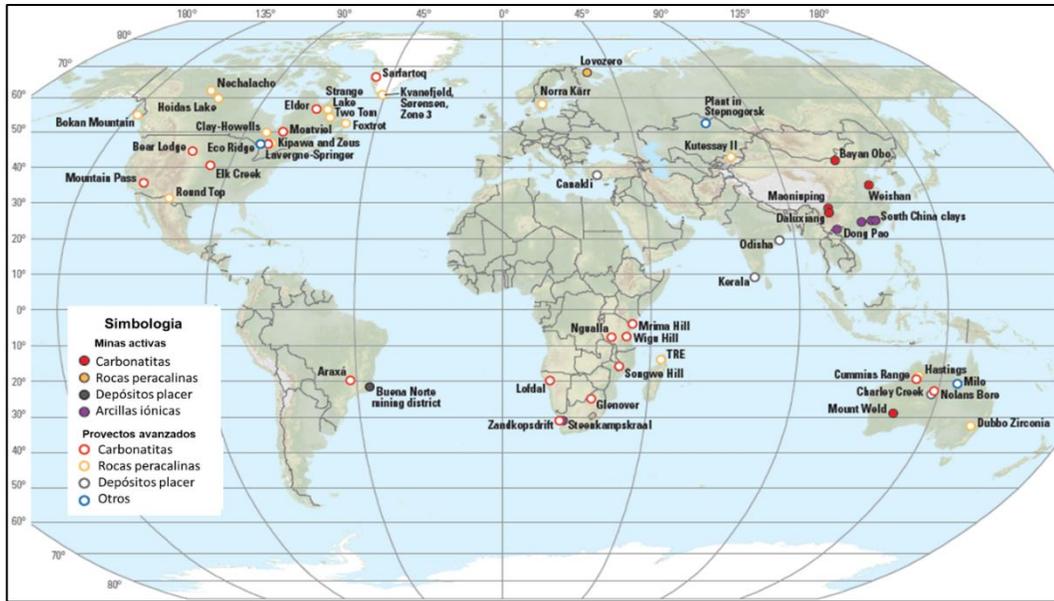


Figura N°2.10: Imagen indicando la distribución mundial, tipos de depósitos, yacimientos activos y proyectos avanzados de tierras raras. Extraído y modificado de Van Gosen et al. (2017).

La situación respecto a depósitos rentables económicamente en Chile es compleja según detalla Cochilco (2016) debido a que como se menciona anteriormente las mayores fuentes de tierras raras se encuentran en rocas alcalinas y carbonatitas, las cuales son escasas en el territorio chileno. Por otro lado se indican a los depósitos tipo IOCG-IOA ubicados en la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa como posibles fuentes de tierras raras.

Los usos y aplicaciones de las tierras raras son variados, la mayoría de estos son aplicados en el desarrollo de tecnologías, aunque cada elemento es utilizado para un propósito en particular como ilustran las figuras a continuación (figs. 2.11 y 2.12).

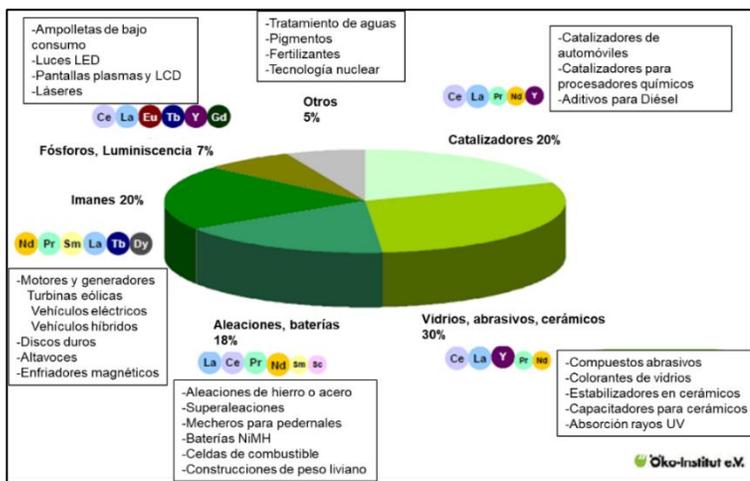


Figura N°2.11: Gráfico ilustrando usos y aplicaciones de tierras raras a nivel mundial. Extraído y modificado de Schüler et al. (2011).

Elemento	Aplicaciones
Escandio	Aleaciones metálicas para industria aeroespacial, para equipos deportivos y equipos de defensa.
Itrio	Cerámicas, aleaciones metálicas, láseres, eficiencia de combustibles, comunicación por microondas para industria de satélites, televisores de color, monitores de ordenador, sensores de temperatura.
Lantano	Baterías, catalizadores en refinación de petróleo, baterías de vehículos eléctricos, cámaras digitales de alta tecnología, cámaras de video, baterías de portátiles, películas de rayos X, láseres.
Cerio	Catalizadores, aleaciones de metales, pulido (de vidrio, espejos, placas frontales de televisión, cristales ópticos, microprocesadores de silicio, lentes), baterías.
Praseodimio	Mejora resistencia a la corrosión de imanes, pigmento, reflectores, lentes para señales de aeropuertos, filtros fotográficos.
Neodimio	Imanes de alta potencia para ordenadores portátiles, motores de vehículos híbridos, generadores de turbinas de viento; láseres; catalizadores para fracturamiento hidráulico, pulido de vidrios..
Prometio	Fuente de radiación beta, catalizadores para fracturamiento hidráulico.
Samario	Imanes de alta temperatura, barras de control de reactores.
Europio	LCDs, luces fluorescentes, aditivos para el vidrio.
Gadolinio	agente de contrastes para formación de imágenes por resonancia magnética, aditivo para vidrios
Terbio	Baterías, fósforos para tubos de TV y lámparas fluorescentes.
Disproseo	Imanes de alta potencia, láseres, baterías.
Holmio	Imanes más poderosos conocidos.
Erbio	Láseres, colorante de vidrio.
Tulio	Imanes de alta potencia.
Yterbio	Tecnología de fibra óptica, paneles solares, aleaciones metálicas (acero inoxidable), láseres, fuente de radiación para unidades de rayos X portátiles
Lutecio	Fósforo de rayos X.

Figura N°2.12: Usos y aplicaciones de cada elemento. Extraído de Cochilco, basado en EPA (2012), Castor y Hedrick (2006)

2.2 Depósitos tipo IOCG-IOA

Los depósitos IOCG (óxidos de hierro-cobre-oro) incluyen una amplia variedad de yacimientos de origen magmático-hidrotermal caracterizados por contener grandes concentraciones de minerales óxidos de hierro (magnetita y/o hematita) además de cobre y oro como menas principales. Otros elementos que se encuentran en estos depósitos son principalmente subproductos de las menas principales de los cuales destacan: cobalto, molibdeno, níquel, tierras raras, uranio, entre otros (Hitzman et al., 1992; Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Skirrow, 2021). Relacionados a los depósitos IOCG también se describen a los depósitos IOA (óxidos de hierro-apatito) o también llamados “tipo Kiruna” los cuales según explica Barton (2014) son un subgrupo distinguido por ser empobrecidos en cobre y contener apatito y actinolita como minerales de alteración.

Hitzman et al. (1992) explica que el descubrimiento del yacimiento australiano “Olympic Dam” en el año 1976 puso el foco en este tipo de depósitos ricos en hierro y otros elementos de gran interés económico, sin embargo como advierte Sillitoe (2003) la amplia variedad de configuraciones tectono-magmáticas en las que se formaron este tipo de depósitos dificulta la tarea de definir sus características principales. En ese ámbito Williams et al. (2005) propone 5 características claves que definen si un depósito clasifica como IOCG, estas son:

1. La presencia de cobre y oro como metales económicos (en el caso del oro su presencia no es determinante).
2. Ocurrencia en vetas y brechas hidrotermales, ubicadas en sitios estructurales específicos.
3. Abundancia de magnetita y/o hematita (sobre un 10%).
4. Minerales óxidos de hierro empobrecidos en titanio.
5. Ausencia de una clara asociación espacio-temporal con intrusiones ígneas.

Otras características comunes pero no presentes en todos los depósitos incluyen:

- Asociación con batolitos granitoides en un tiempo-espacio amplio.
- Metasomatismo pervasivo de composición alcalina y de gran volumen.
- Geoquímicamente diverso en contenido de elementos menores (cobalto, flúor, níquel, molibdeno, tierras raras, uranio).

Estas características fueron complementadas por Groves et al., (2010) con el objetivo de aportar otros rasgos presentes en estos depósitos, a continuación se especifican:

1. Cobre y oro como metales económicos.
2. Características hidrotermales y controles estructurales, comúnmente en formas de brechas y vetas.
3. Abundancia de óxidos de hierro empobrecidos en titanio (magnetita, hematita) y/o silicatos ricos en hierro (grunerita, actinolita, fayalita).
4. Enriquecimiento en tierras raras livianas y sulfuros incluyendo calcopirita, bornita, calcosina y pirrotina.
5. Bajo contenido de alteraciones ricas en SiO_2 y ausencia de vetas de cuarzo.
6. Relación temporal con magmatismo, pero sin evidencias claras respecto a la distancia de intrusiones.

Los depósitos IOA agrupan una serie de yacimientos caracterizados por: contener minerales con fósforo en su estructura química (apatito), poseer minerales óxidos de hierro empobrecidos en titanio, estar asociados a grandes volúmenes de rocas con alteración sódica a sódica-cálcica, rocas mineralizadas generalmente ocurriendo en cuerpos brechiformes y vetiformes, por último tienen bajas cantidades de oro y además carecen de concentraciones económicamente rentables de cobre (Grooves et al., 2010; Barton, 2014).

El nexo entre los depósitos tipo IOCG e IOA ha sido debatido largamente desde que Hitzman et al. (1992) incluyó en su estudio a los depósitos de óxidos de hierro ubicados

en Kiruna a su estudio de depósitos tipo IOCG formados durante el precámbrico. Sillitoe (2003) indica que en muchos distritos depósitos tipo IOA se encuentran asociados espacial y temporalmente a depósitos IOCG (por ejemplo en la Franja Ferrífera de Chile), a estos antecedentes se les sumó Williams et al. (2005) quien propone ciertas características que comparten estos depósitos, las cuales son:

1. Coexistencia con depósitos IOCG en provincias metalogénicas.
2. Asociación con sistemas de alteración sódica y alcalina a gran escala.
3. Variada concentración de elementos menores (cobre, oro, fósforo, flúor, tierras raras, uranio).

En tanto Corriveau et al. (2016) propuso un modelo de zonificación de alteración, basado en observaciones en la zona magmática “Great Bear” (Canadá), en la cual los depósitos tipo IOA caracterizados por una facie de alteración sódica-cálcica se formaron a mayor profundidad, temperaturas más altas (800-600°C) y por tanto más temprano que depósitos IOCG los cuales se señalan a temperaturas menores (alrededor de 400-250°C) y emplazados a menor profundidad. Por otro lado Barra et al. (2017) en su estudio realizado en depósitos IOA e IOCG ubicados en la Cordillera de la Costa de Chile propone un modelo el cual ilustra la ubicación a mayor profundidad de los depósitos tipo IOA respecto de los IOCG, también se denota una transición entre estos depósitos marcada por un enriquecimiento en minerales de cobre, finalmente sobre esta transición se encuentran depósitos tipo manto e IOCG ricos en magnetita y hematita caracterizados por un estilo de mineralización en vetas y brechas además de una mayor distribución de sulfuros de cobre. Ambos estudios sugieren que la formación de depósitos IOA precedió al desarrollo de los IOCG.

Los depósitos IOCG y sus asociados propuestos se encuentran en un rango de edad que va desde cerca de los 2600 Millones de años hasta el Cenozoico, y sus leyes de cobre pueden variar aproximadamente hasta tres órdenes de magnitud $<0,1$ - $<10\%$ (Groves et al., 2010). Williams et al. (2005) explica que estos depósitos se encuentran presentes en casi todos los continentes del mundo y cada provincia presenta sus características distintivas en torno a la mineralización, las cuales presentan abundancia de óxidos de hierro, y como elementos accesorios cobre, oro, cobalto y/o tierras raras. En tanto la alteración hidrotermal dominante en estos es de composición sódica o sódica-cálcica y se presenta en gran extensión.

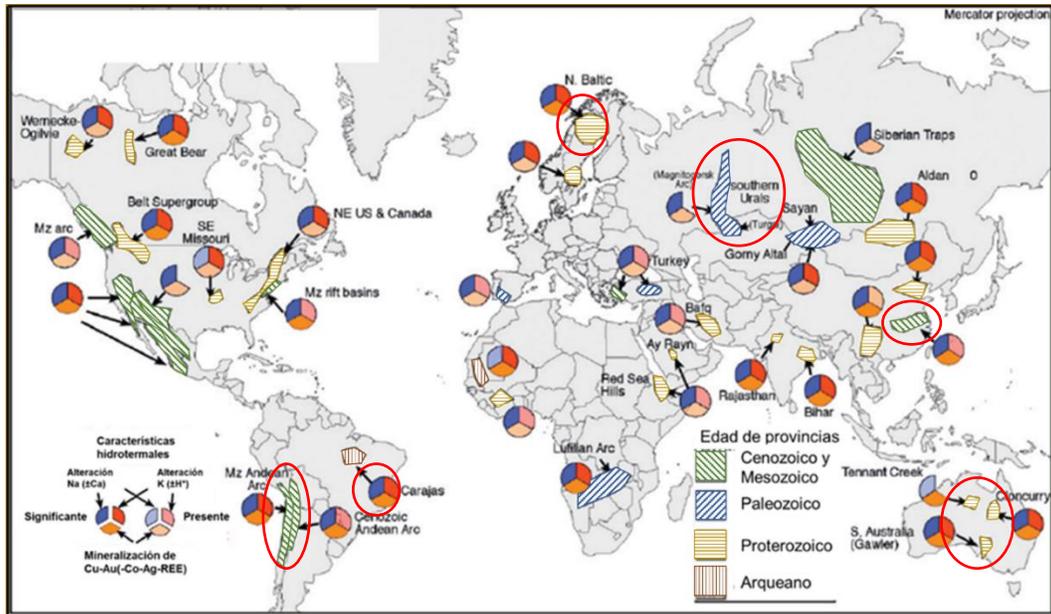


Figura N°2.13: Imagen mostrando la distribución mundial de depósitos IOCG, edades de provincias y mineralización de cobre y/u oro. Extraído y modificado de Barton, (2014) basado en Williams et al., (2005).

Barton (2014) reporta que los depósitos más importantes y económicamente rentables son los ubicados en las siguientes provincias metalogénicas (encerradas en círculo rojo en la fig. N°2.13):

- Andes centrales (edad mesozoico, cobre + hierro)
- Yangtze (edad mesozoico, hierro ± cobre)
- Urales del sur (edad paleozoico, hierro)
- Sur de Australia (edad meso proterozoico, cobre + uranio + oro)
- Norte y centro de Australia (edad paleo-meso proterozoico, cobre + oro)
- Báltica norte (edad paleo proterozoico, hierro ± cobre)
- Carajas (edad arqueano tardío, cobre + oro)

Como se mencionó previamente cada provincia metalogénica presenta distintas condiciones geológicas que determinaron la formación de los depósitos ubicados en estas (ver fig. N°2.14), en este ámbito Hitzman et al. (1992) describe que los depósitos ubicados en provincias metalogénicas de edad Proterozoico se posicionan en regiones continentales pertenecientes a cratones los cuales preservan evidencias de procesos de “rifting” ocurrido previa o durante la mineralización, además se localizan a lo largo de zonas de fallas asociado a una tectónica extensional, en base a estas evidencias propone que su formación ocurre durante el quiebre de un supercontinente sucedido durante el proterozoico. Groves et al. (2010) indica que los depósitos precámbricos (Olympic Dam, Vergenoeg) presentan ciertos controles tectónicos entre los cuales destacan que se encuentran emplazados en un entorno intracratónico con corteza engrosada (50 km.) y presentan un magmatismo atípico básico a félsico. A pesar de los variados estudios respecto a la formación de los depósitos IOCG precámbricos Barton (2014) advierte que sus orígenes y evolución siguen siendo

materia de debate debido a que sufrieron de variados procesos tectónicos a lo largo de su historia.

Los depósitos IOCG fanerozoicos contrastan marcadamente con sus análogos precámbricos, formándose durante periodos de dispersión y reensamble de continentes en ambientes de arco activo (Groves et al., 2010). Williams et al. (2005) explica que los depósitos mesozoicos-cenozoicos ubicados a lo largo de continentes modernos en el este de China, la Cordillera Americana y el este de Estados Unidos incluyen skarns y vetas de hierro (cobre-cobalto-oro) asociados a intrusiones basálticas, en tanto los depósitos permo-triasicos de Siberia se caracterizan por una ocurrencia brechiforme con una extensa alteración sódica-cálcica y carecen de concentraciones económicas de cobre. Por otro lado Sillitoe (2003) señala que los depósitos de la Cordillera de la Costa de Chile (Candelaria, Punta del Cobre) y del sur del Perú se encuentran asociados al emplazamiento de batolitos mesozoicos y un sistema de fallas paralelas a la formación del arco volcánico de esa época. Los magmas del arco fueron predominantemente calco-alcalinos y en gran medida emplazados durante la extensión del antiguo margen continental que también producía cuencas marinas poco profundas con rocas carbonatadas y evaporitas (Williams et al., 2005).

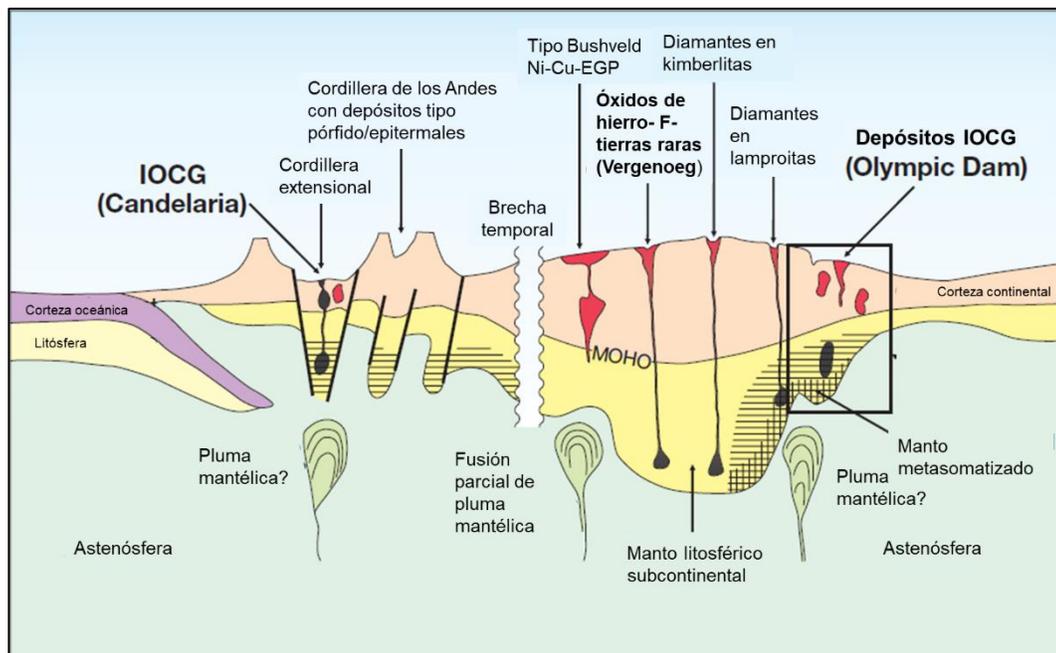


Figura N°2.14: Diagrama esquemático mostrando características tectónicas y litosféricas de depósitos IOCG correspondientes al precámbrico y de la Cordillera de la Costa. (EGP: Elementos grupo platino). Extraído y modificado de Groves et al., (2010).

El origen de los fluidos hidrotermales responsables de la mineralización y alteración de estos depósitos en muchos casos es incierto debido a la ausencia de una asociación clara a intrusiones o la falta de fuentes secundarias. Al respecto Hitzman et al. (1992) declara que las fuentes de estos fluidos pueden ser magmáticos o no magmáticos, destacando que los fluidos magmáticos pudieron ser generados por la exsolución de una fase rica en

volátiles en magmas de gran volumen, en tanto los fluidos no magmáticos corresponden a aguas meteóricas provenientes de prismas acrecionales que circulan debido al calentamiento generado por la intrusión, sin embargo advierte que en el segundo caso es más improbable debido a que no todos los distritos preservan rocas sedimentarias. El origen magmático de los fluidos es el más aceptado por otros autores (Sillitoe, 2003; Pollard, 2006; Groves et al., 2010) como la principal fuente debido a que para formar depósitos de grandes dimensiones (por ejemplo Olympic Dam) se requiere una gran cantidad de fluidos hidrotermales que circulen por el sector. Por otro lado, Barton y Jhonson (1996) destacan que las fuentes no magmáticas de fluidos hidrotermales pueden provenir desde ambientes evaporíticos formados previa o contemporáneamente a los depósitos. A su vez Williams et al. (2005) señala que estas fuentes pueden ser separadas en dos categorías, aquellas en las que los fluidos provienen desde la superficie o cuencas poco profundas y fluidos generados producto de procesos metamórficos ocurridos en el interior de la corteza.

La variabilidad de características, rocas asociadas, formas del cuerpo mineral y la naturaleza del mineral de estos depósitos, más allá de los componentes mineralógicos comunes del mineral y las características generales de alteración hidrotermal, significa que los modelos de la génesis de estos depósitos son incompletos (Ridley, 2013).

2.2.1 Depósitos IOCG-IOA en Chile

Los yacimientos de óxidos de hierro-cobre-oro corresponden a depósitos ricos en magnetita y/o hematita y que junto con los yacimientos de hierro tipo Kiruna constituyen los miembros extremos de un continuo. En Chile, este tipo de yacimiento se distribuye, principalmente, en la Cordillera de la Costa, entre los 22 y 30° S, como una franja continua que se superpone con la bien definida Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa (Vivallo, 2009). Los depósitos agrupados en esta franja (ver fig. N°2.15) fueron formados durante el mesozoico principalmente divididos en dos etapas de mineralización, la primera etapa aconteció en el Jurásico (165-155 Ma.), en tanto la segunda etapa ocurrió en la época Cretácico temprano (120-100 Ma.) y es señalada como el evento metalogénico más importante que dio paso a la formación de depósitos de tipo IOCG e IOA (por ejemplo: Cerro Negro, Cerro Imán, Mantoverde, Candelaria) (Sillitoe, 2003; Vivallo et al., 2009; Chen et al., 2013).

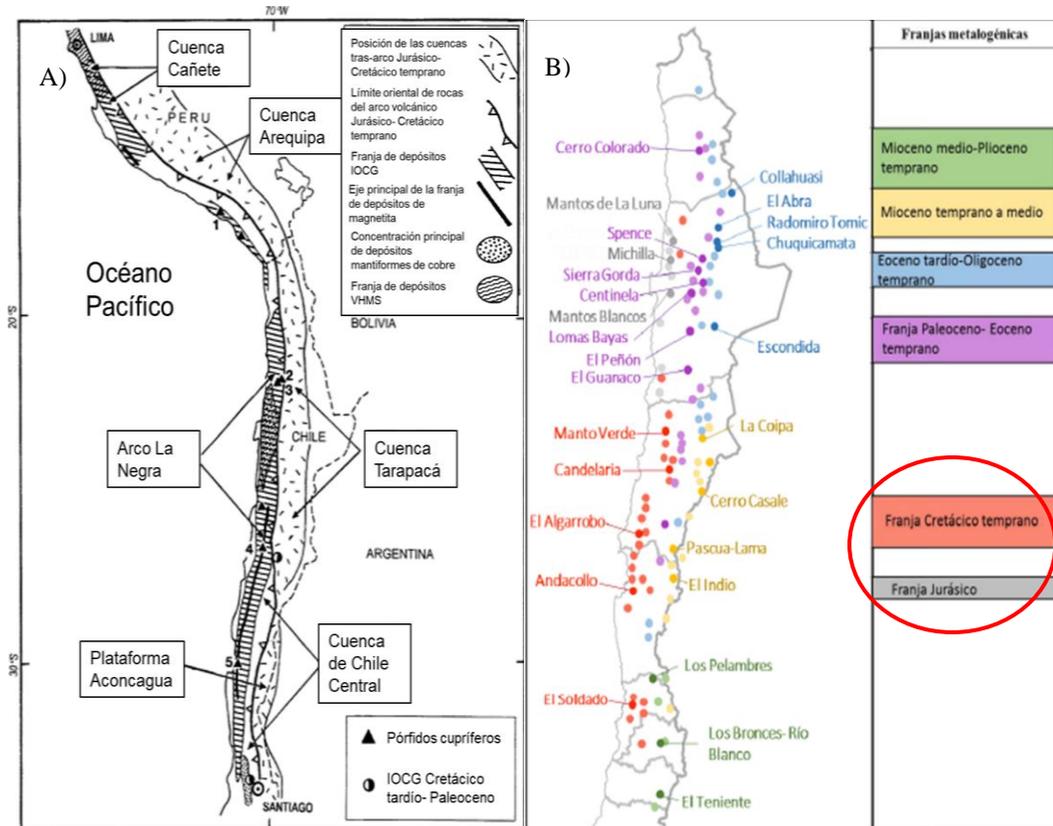


Figura N°2.15: Imagen mostrando la posición de la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa y depósitos pertenecientes a esta. A) Imagen ilustrando la extensión de la Franja de depósitos tipo IOCG distribuidos entre Chile y Perú y otros rasgos morfológicos. Extraído y modificado de Sillitoe (2003). B) Franjas metalogénicas de Chile y depósitos incluidos en cada franja (circulo en rojo destaca la edad de los depósitos pertenecientes a la Franja Ferrífera de Chile). Extraído y modificado de Cochilco (2016a).

El desarrollo de la Cordillera de la Costa comienza a partir del Jurásico y se prolonga hasta el Cretácico, caracterizado por un régimen de subducción de alto ángulo (tipo “mariana”) el cual dio paso a un régimen extensivo tanto en el arco como en el trasarco, es en estos sectores donde los plutones intruyeron rocas volcánicas (Fm. La Negra) y sedimentarias (Grupo Chañarcillo, Punta del Cobre). Asociado a la intrusión de estos plutones ocurre la formación de estos depósitos (Sillitoe, 2003; Cembrano et al., 2009; Vivallo, 2009). Un rasgo característico de estos depósitos según explica Maksaev et al., (2007) es que todos ocurren dentro del dominio del segmento sur del Sistema de Fallas Atacama, este sistema de fallas de rumbo sinistral se extiende más de 1000 km. a lo largo de la Cordillera de la Costa y está relacionada a la convergencia oblicua de la placa subductada durante esa época.

2.3 Geología regional

La evolución geológica de la región está directamente vinculada al régimen de subducción imperante en el tiempo. Uyeda y Kanamori (1979) explican que durante el Mesozoico inferior el régimen de subducción era del tipo “Mariana” lo que conllevó el desarrollo de

un arco magmático (actual Cordillera de la Costa) y una cuenca de trasarco. En este contexto Charrier et al., (2007) manifiesta que a consecuencia de la inactividad de la subducción desarrollada en el ciclo Pre-Andino (en un lapso de 40-50 millones de años) el acople entre las placas era bajo, generando condiciones extensionales en el arco magmático y en el trasarco, estas condiciones se mantuvieron desde el Jurásico hasta el Cretácico inferior permitiendo un magmatismo intenso en el arco y una abundante sedimentación en la cuenca de trasarco la cual fue afectada por ciclos regresivos-transgresivos en el transcurso del tiempo. El intenso vulcanismo desarrollado en esta época se encuentra documentado en las formaciones La Negra y Punta del Cobre.

Durante el Cretácico inferior alto se emplazaron en la Cordillera de la Costa, al este de la traza principal del Sistema de Fallas Atacama, cinco plutones mayores: La Brea (123-117 Ma.), San Juan (ca. 115 Ma.), San Gregorio (ca. 111 Ma.), La Borracha (114-103 Ma.) y Sierra Atacama (117-104 Ma.), los cuales intruyeron rocas volcánicas y volcanoclásticas de las formaciones La Negra y Punta del Cobre (Arévalo, 2005).

Arévalo (2005) indica que las rocas de la Cordillera de la Costa fueron desplazadas sinistralmente a lo largo de la traza principal y la rama occidental del Sistema de Fallas Atacama, de manera dúctil, bajo facies de esquistos verdes y temperaturas menores a las magmáticas durante el enfriamiento de los plutones, hace unos 125 millones de años (Dallmeyer et al., 1996 ; Scheuber y Andriessen, 1990) en las zonas de Chañaral y Antofagasta, sin embargo para los plutones emplazados en sectores aledaños a Copiapó este desplazamiento ocurre posteriormente, hace 116-103 millones de años.

El desarrollo de la cuenca de trasarco según detalla Charrier et al., (2007) en esta época está marcado por una amplia sucesión de depósitos marinos y continentales intercalados con depósitos volcánicos. El Grupo Chañarcillo es una secuencia de rocas carbonatadas marinas fosilíferas de edad Valangiano superior-Aptiano y se compone desde base a techo de las formaciones Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón, las cuales representan ciclos de transgresión-regresión ocurridos durante su deposición. Este grupo es señalado como el principal componente de la cuenca de trasarco.

A principios del Cretácico superior se produjo un cambio en la interacción de las placas que colisionaban en el margen continental de Sudamérica. Este cambio según relata Charrier et al., (2007) está relacionado a una fase de alta producción de corteza oceánica en el océano pacífico primitivo, lo que generó una reducción en el ángulo de subducción de la placa ubicada en el margen continental sudamericano a una subducción del tipo “chilena” y por tanto una migración hacia el este del arco magmático. A su vez, como consecuencia de los cambios en la interacción de las placas se produjo un pulso de deformación compresiva conocida como la “Fase Peruana” la cual provocó la inversión de la cuenca de trasarco formada previamente pasando a formar una cuenca de antepaís.

Durante el Campaniano-Maastrichtiano (80-65 Ma.) la depositación se reanudó con la formación de una cuenca extensional (Cuenca Hornitos) en parte del tipo hemigraben, bordeada al oeste por la falla de crecimiento Elisa de Bordos y construida en los estratos de la Formación Cerrillos. Fallas normales invertidas y pliegues de ejes paralelos a

oblicuos al borde de la cuenca, que afectan al relleno sedimentario de Hornitos y no a la suprayacente Formación venado señalan la existencia de una nueva fase de acortamiento en el límite Cretácico Superior- Paleoceno inferior (Arévalo, 2005). Esta fase de deformación es conocida como la “Fase Incaica I” o “K-T” de acuerdo a Charrier et al., (2007) y fue controlada por la oblicuidad de convergencia de la placa subductada.

A partir del Mioceno medio y hasta el Plioceno se depositan sobre la Cordillera de la Costa y Precordillera extensas cubiertas de sedimentos aluviales, coluviales y fluviales (Gravas de Atacama, Depósitos aluviales y coluviales antiguos). Estos depósitos se habrían formado durante un periodo de agradación regional a gran escala, producido como consecuencia de un alzamiento generalizado del Altiplano, a partir del Mioceno medio, en los inicios del proceso de disminución del ángulo de subducción entre los 28° y 33° (Mpodosis et al., 1995). Los depósitos formados posteriormente corresponden a depósitos de tipo eólicos, aluviales y fluviales no consolidados que rellenan quebradas y depresiones topográficas.

2.4 Geología local

En la zona de estudio afloran principalmente tres unidades litológicas, las cuales son descritas a continuación.

2.4.1 Rocas estratificadas

Formación La Negra (Pliensbachiano- Jurásico superior): Corresponde a una secuencia homogénea de lavas andesíticas y sedimentos volcanoclásticos subordinados, que se expone como una franja norte-sur de rocas cornificadas ubicadas entre milonitas de la traza principal del Sistema de Falla de Atacama y el contacto intrusivo con los plutones La Brea y La Borracha (Arévalo, 2005).

2.4.2 Rocas intrusivas

Diorita Cuarcifera Sierra Chicharra (128-125 Ma.): Corresponde a un intrusivo compuesto por dioritas cuarcíferas, alargado por unos 40 kilómetros en dirección NNE desde la sierra Chamonate, en el norte donde aflora acuñado entre dioritas del Plutón Cerro Morado y metaandesitas de la Formación La Negra, hasta la sierra Chicharra en el Sur (Godoy et al., 2003). Al este, las rocas intrusivas limitan con milonitas subverticales de la traza principal del SFA, que se yuxtaponen con la Formación La Negra y los plutones La Brea y Sierra Atacama (Arévalo, 2005).

Diorita La Brea (123-117 Ma.): Unidad definida por Arévalo (2005) que corresponde al cuerpo plutónico con mayor superficie expuesta en la región (270 Km² de exposición total). Está compuesto de dioritas con clinopiroxeno y hornblenda y por monzodioritas con biotita, presenta una geometría romboidal orientada en forma norte-sur. En la zona de estudio limita con afloramientos de la Formación La Negra y Diorita Cuarcifera Sierra Chicharra, además es cortada por la traza principal del SFA.

Además de las rocas mencionadas anteriormente se observan unidades no consolidadas de edades Mioceno superior-Plioceno y Cuaternario descritas por Arévalo (2005) como depósitos aluviales y coluviales antiguos y depósitos aluviales. Respecto a los depósitos de edad Mioceno superior-Plioceno se definen como gravillas a ripios mal consolidados con matriz tamaño arena, limo o arcilla constituyendo conos aluviales, depósitos coluviales y llanuras de inundación. En tanto los depósitos aluviales de edad Cuaternario se componen de depósitos no consolidados de ripios, gravas y arenas mal clasificadas transportadas como flujos gravitacionales, estos son separados en activos e inactivos.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Etapa de pre-terreno

En la etapa de pre-terreno se ejecutaron dos tareas explicadas a continuación:

- Inicialmente se desarrolló una recopilación bibliográfica relacionada a características, concentración y distribución en depósitos de los elementos estratégicos, también relacionada a las características de los depósitos que posiblemente se encontraran en el sector de estudio. Esta información fue obtenida desde publicaciones académicas, libros y mapas geológicos.
- Posteriormente a través de la observación de imágenes satelitales se establecieron zonas de interés en el sector de estudio para la posterior extracción de muestras durante la etapa de terreno. Las imágenes satelitales se estudiaron utilizando el programa Google Earth.

3.2 Etapa de terreno

En la etapa de terreno se realizaron las siguientes actividades:

- En las zonas de interés marcadas previamente se tomaron coordenadas UTM del sector mediante una aplicación de celular llamada “UTM Geo Map”. El Datum utilizado para tomar las coordenadas del sector fue WGS84. Después, se escribió una breve descripción de la geología del sector haciendo énfasis en la morfología del cuerpo mineralizado además de esquematizarlo.
- A continuación de la identificación de la morfología del cuerpo mineralizado. En aquellos de morfología vetiforme, se estimaron las dimensiones de estos y se tomaron datos estructurales en notación círculo completo mediante el uso de una brújula GeoBrunton. En aquellos con otras morfologías, solo se esquematizaron.
- Posteriormente se recolectaron muestras representativas de los cuerpos mineralizados. Para la extracción de estas se tomaron en cuenta características como la morfología del cuerpo mineralizado, la cual en su mayoría era vetiforme, y si este cuerpo se encontraba trabajado en labores subterráneas o a cielo abierto.
- Se recolectó un total de 63 muestras repartidas entre los 11 sectores visitados a lo largo de la zona de estudio.
- En el caso de los cuerpos vetiformes trabajados en labores subterráneas las muestras fueron extraídas desde puntos de acumulación o desmontes de la labor minera para mayor seguridad. Estas muestras fueron codificadas en base al número del sector y el número de muestra (Ejemplo: P3M2), el código fue escrito en cinta de papel y la muestra obtenida fue envuelta en esta cinta. Las muestras fueron guardadas en bolsas plásticas para muestras de 30x40 cm. las cuales también fueron codificadas con las coordenadas del sector y el número del sector.
- Para el caso de los cuerpos vetiformes trabajados en labores a cielo abierto la extracción de muestras fue realizada directamente desde la veta y también desde

la roca de caja. Las muestras igualmente fueron codificadas con el número del sector y número de muestra (Ejemplo: P3M2), envueltas en cinta con el código y guardadas en bolsas plásticas previamente codificadas.

3.3 Etapa de post-terreno

Durante la etapa de post-terreno se cumplieron una serie de tareas detalladas a continuación:

- Primeramente se realizó una base de datos de las muestras recolectadas. En la cual, se registraron los siguientes parámetros: Coordenadas UTM (norte y este), estructura desde donde se extrajo la muestra, tipo y modo de ocurrencia de la mineralización, roca de caja y comentarios generales.
- Antes de realizar los análisis geoquímicos, las muestras fueron cortadas con un galletero con disco de acero para reducir el tamaño de estas y exponer una cara plana para aumentar la señal geoquímica durante los análisis. Al realizar estos cortes las muestras resultantes fueron codificadas nuevamente para evitar confusiones.
- Se realizaron análisis geoquímicos mediante Fluorescencia de rayos X. Para esto se utilizó un equipo marca BRUKER modelo S1 TITAN (Ver fig. N°3.1). Las rocas mineralizadas fueron analizadas por el método de elementos traza (el cual detecta una variedad de 45 elementos). En casos en los que los valores de los elementos de interés medidos fueran altos se realizaron dos o más análisis distribuidos en las caras frescas de las rocas. Se totalizaron 87 análisis geoquímicos.
- Los datos de concentración de elementos fueron recuperados desde el software Bruker Data Stream para posteriormente ser registrados en tablas realizadas en Microsoft Excel.
- A partir de los resultados de los análisis geoquímicos, se decidió enfocar la construcción de gráficos estadísticos en los siguientes elementos: bismuto, cobalto, manganeso, níquel, vanadio e itrio. Esto debido a que fueron los elementos más frecuentemente detectados en las muestras analizadas.
- Con la finalidad de analizar la distribución estadística de los resultados geoquímicos y sus respectivas correlaciones, se construyeron gráficos binarios y de caja y bigote (Boxplot) mediante el programa Excel 2019.
- Para la construcción de los gráficos de caja y bigote se filtraron los valores iguales a 0 con el objetivo de visualizar de mejor manera los valores detectados a nivel general en la zona de estudio. En los demás gráficos si se tomaron en cuenta los valores iguales a 0.
- A partir de los datos geoquímicos se seleccionaron un total de 9 muestras, que poseían altas concentraciones de elementos de interés, las cuales fueron enviadas a un laboratorio que preparó secciones transparentes y/o pulidas de las muestras. Para seleccionar el tipo de sección (transparente o pulida) se tomaron en cuenta las características de la roca mineralizada; en aquellas que fueran mineralizaciones

masivas de magnetita se decidió por sección pulida, en tanto las rocas que no tenían las características mencionadas previamente se decidió por corte pulido y transparente. En total se realizaron 9 secciones pulidas y 2 transparentes.

- Las secciones transparentes y pulidas fueron descritas mediante un microscopio binocular marca Motic modelo BA310 pol (Ver fig. N°3.1). Las secciones transparentes fueron analizadas mediante luz transmitida mientras que las pulidas fueron analizadas por medio de luz reflejada.
- Finalmente se levantó y digitalizó un mapa geoquímico mediante el software Arcgis 10.5. En este las concentraciones anómalas fueron definidas tomando en cuenta el valor de la mediana obtenida al realizar el gráfico de caja y bigote (Boxplot) de cada sector.



Figura N°3.1: Fotografías de equipo utilizado para análisis geoquímicos y microscopio para observaciones microscópicas. A) Equipo de Fluorescencia de rayos X S1 Titán. B) Software adjunto al equipo. C) Microscopio binocular Motic Ba 310 pol. D) Caja de luz reflejada para análisis de secciones pulidas. (Elaboración propia).

Capítulo 4: Resultados

4.1 Geología de las zonas mineralizadas

La fig. N°4.1 ilustra los sectores mineralizados y desde donde se extrajeron las muestras, a lo largo de la zona de estudio. Estos sectores presentan características geológicas variadas (morfología de los cuerpos mineralizados, tipo y modos de ocurrencia de mineralización), las cuales son descritas a continuación (las abreviaturas de minerales en fotografías están basadas en Warr (2021)).

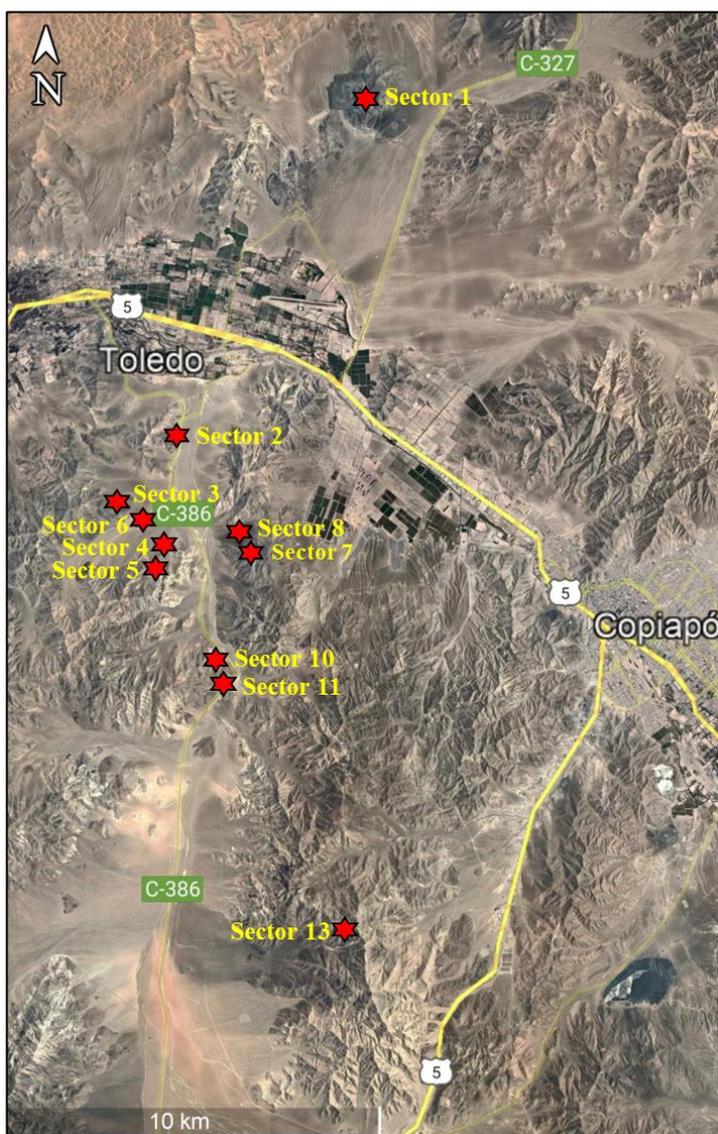


Figura N°4.1: Sectores mineralizados y de extracción de muestras a lo largo de la zona de estudio. (Elaboración propia. Imagen satelital extraída y modificada de Google Earth)

4.1.1 Sector 1

Coordenadas UTM:

361685 E 6984667 N

Zona de labor minera a cielo abierto ubicada al norte de sector Cerro Imán conocido como mina “Bellavista” donde se realiza la extracción principalmente de hierro. El cuerpo presenta una mineralización masiva de óxidos de hierro, mientras que la roca de caja corresponde a andesitas con textura porfídica.

La fig. N°4.2 ilustra las fotografías tomadas de la muestra de mano y sección pulida correspondiente a la muestra M2x2. Esta roca se encuentra mineralizada de manera masiva con magnetita y presenta una oxidación leve a hematita principalmente en los bordes de contacto con cristales de silicatos. También presenta vetillas secundarias rellenas de cuarzo.

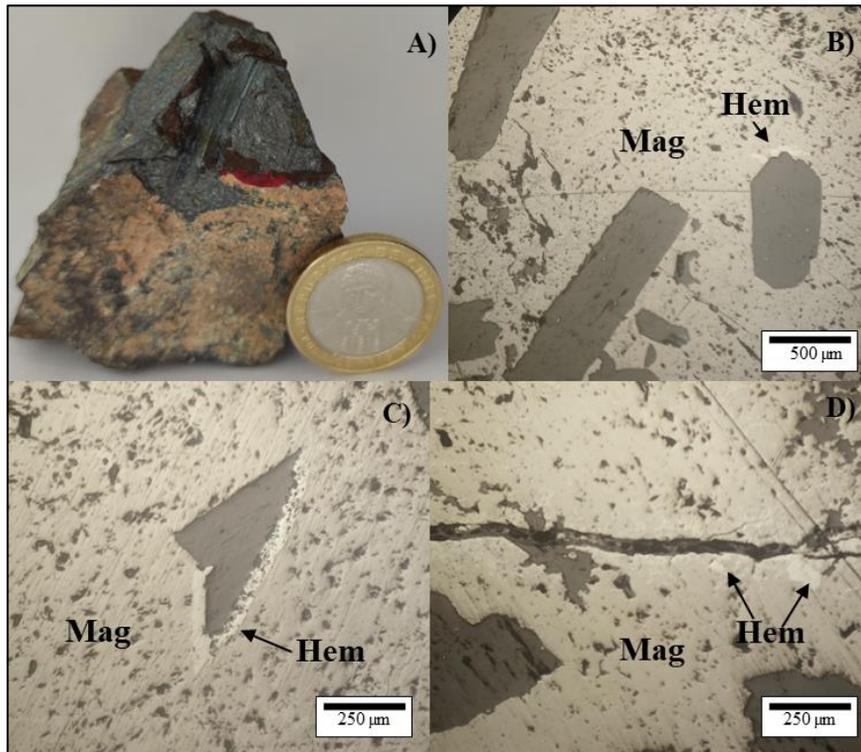


Figura N°4.2: Fotografías de la muestra de mano y secciones pulidas. A) Fotografía de muestra de mano seleccionada. B) Fotografía de sección pulida en aumento 5x en luz polarizada plana. C) y D) Fotografías de sección pulida en aumento 10x en luz polarizada plana. Hem: Hematita, Mag: Magnetita. (Elaboración propia).

4.1.2 Sector 2

Coordenadas UTM:

356942 E 6976358 N

Labor minera abandonada ubicada al oeste de la ruta C-386 a la altura del km. 5 aproximadamente, en donde, el cuerpo mineralizado corresponde a una veta de magnetita con actitud 282/88 y ancho aproximado de 2-2,5 metros. También se observan vetas y vetillas menores de cuarzo y zonas de brechas hidrotermales con clastos magnéticos y matriz de cuarzo, además se observan zonas menores mineralizadas con óxidos de cobre. Roca de caja corresponde a diorita con cristales faneríticos de plagioclasa alterados a arcillas, también presentan actinolitas.

La fig. N°4.3 presenta las fotografías tomadas a la muestra de mano P2M10x1 su y sección pulida correspondiente. Esta roca exhibe una mineralización principalmente de magnetita masiva y en cristales subhedrales a euhedrales oxidados muy levemente a hematita, por otro lado se observa una mineralización de “óxidos de cobre” (crisocola) de forma diseminada acompañada por cristales de cuarzo.

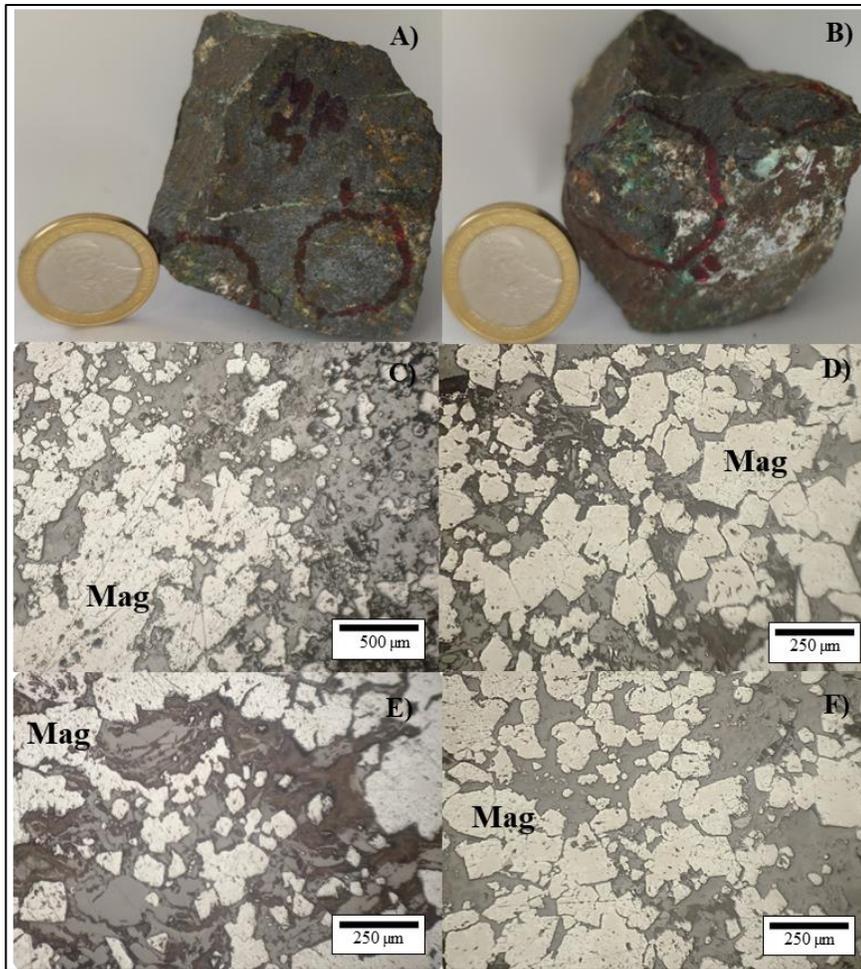


Figura N°4.3: Fotografías de muestras de mano y sección pulida. A) y B) Muestra de mano seleccionada. C) Fotografía de sección pulida en aumento 5x con luz polarizada plana. D), E) y F) Fotografías de sección pulida en aumento 10x con luz polarizada plana. Mag: Magnetita. (Elaboración propia).

4.1.3 Sector 3

Coordenadas UTM:

355807 E 6974352 N

Labor minera abandonada posicionada al oeste de la ruta C-386 a la altura del km. 7 aproximadamente, en la cual, el cuerpo mineralizado corresponde a una veta de magnetita de ancho aproximado 2-2,5 metros. La veta presenta una actitud 315/88 y se encuentra acompañada de calcita y crisocola, además es cortada por una veta de cuarzo con cristales pegmatíticos. La roca de caja corresponde a una diorita con cristales de biotita.

La fig. N°4.4 muestra las fotografías tomadas a la muestra 3m13 y su sección pulida correspondiente. Esta muestra presenta una mineralización de magnetita alterada intensamente a hematita. Los cristales exhiben formas subhedralas con texturas aciculares

y fibrosas. También se observa una mineralización de crisocola de manera diseminada con cristales anhedrales.

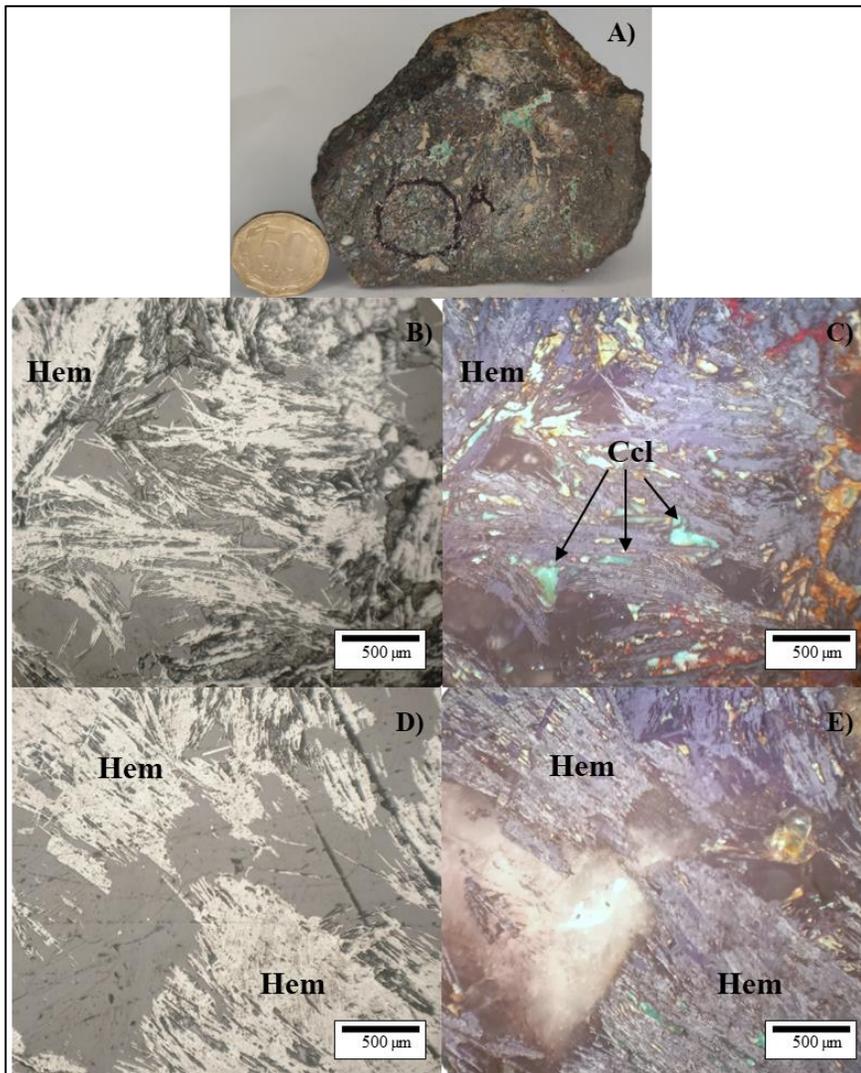


Figura N°4.4: Fotografías de muestra de mano y sección pulida. A) Muestra de mano seleccionada. B) Fotografía de sección pulida en aumento 5x con luz polarizada plana, C) mismo sector con nicols cruzados. D) Fotografía de sección pulida en aumento 5x con luz polarizada plana, E) mismo sector con nicols cruzados. Hem: Hematita, Ccl: Crisocola. (Elaboración propia).

La fig. N°4.5 ilustra las fotografías tomadas a la muestra 3m100 y su sección pulida correspondiente. Esta roca se encuentra mineralizada con magnetita masiva alterada intensamente a hematita, además se observan cristales de silicatos subhedrales a euhedrales inmersos en la masa de magnetita.

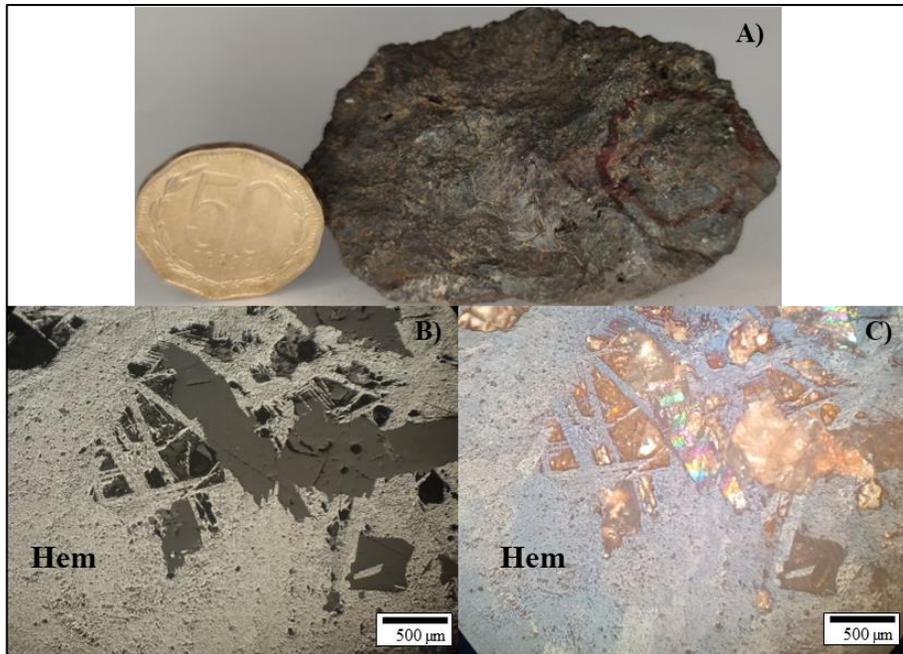


Figura N°4.5: Fotografías de muestra de mano y sección pulida. A) Muestra de mano seleccionada. B) Fotografía de sección pulida en aumento 5x con luz polarizada plana, C) mismo sector con nicols cruzados. Hem: Hematita. (Elaboración propia).

4.1.4 Sectores 4 y 5

Coordenadas UTM:

356833 E 6973191 N

Labor minera abandonada ubicada al oeste de la ruta C-386 a la altura del km. 9 aproximadamente, en la cual, el cuerpo mineralizado corresponde a una veta de magnetita y hematita alojada en rocas milonitas. La veta presenta una actitud 80/80 y ancho aproximado de 1-1,5 metros.

La fig. N°4.6 presenta las fotografías tomadas a la muestra M2P5 y su sección pulida correspondiente. En esta muestra se observa una mineralización de magnetita masiva alterada intensamente a hematita, la cual exhibe texturas tabulares alargadas y fibrosas. Además se observan cristales anhedrales de cuarzo dispersos en la roca mineralizada.

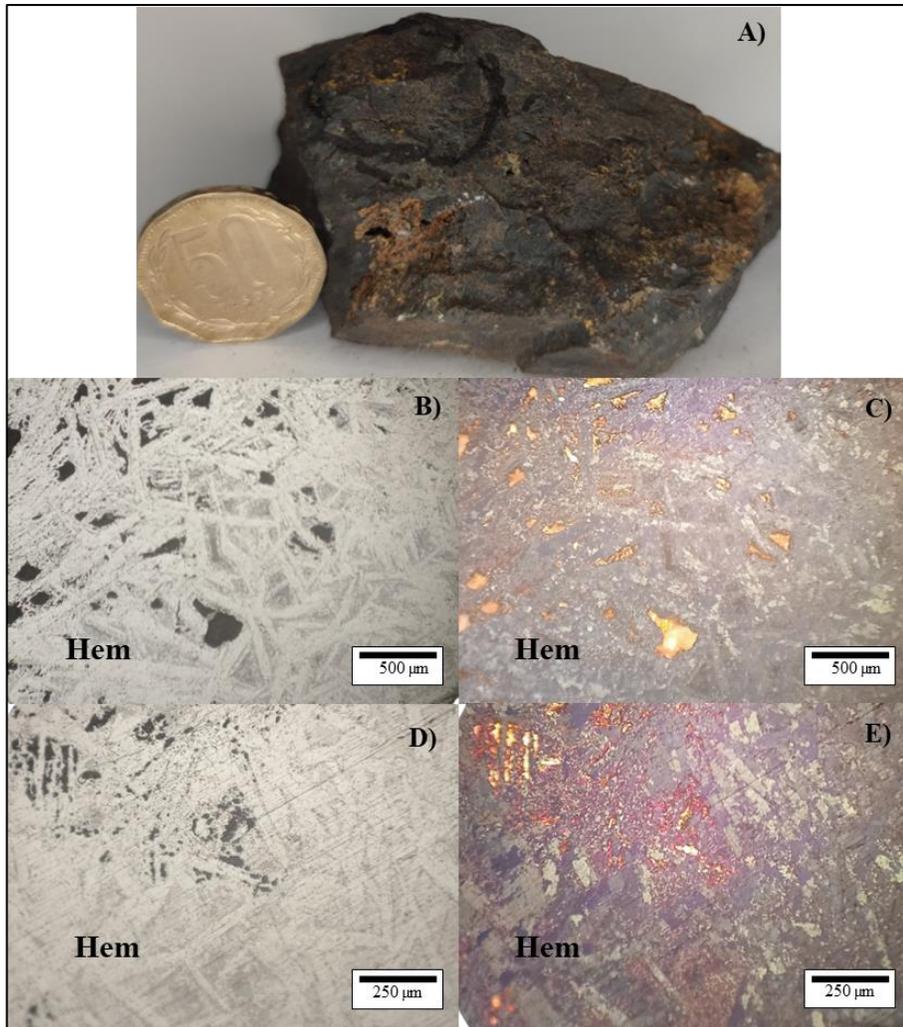


Figura N°4.6: Fotografías de muestra de mano y sección pulida. A) Muestra de mano seleccionada. B) Fotografía de sección pulida en aumento 5x con luz polarizada plana C) mismo sector en nicoles cruzados. D) Fotografía de sección pulida en aumento 10x con luz polarizada plana E) mismo sector en nicoles cruzados. Hem: Hematita. (Elaboración propia).

4.1.5 Sector 6

Coordenadas UTM:

355855 E 6974169 N

Labor minera abandonada ubicada aproximadamente a 200 metros hacia el sur del sector 3. Donde el cuerpo mineralizado corresponde a una veta de óxidos de hierro (magnetita y hematita), con crisocola en menor cantidad y diseminada. Adicionalmente se observa una fuerte presencia de calcita en vetillas cortando la veta principal y alrededores de ella. El ancho de la veta es de 1,5 metros aproximadamente y presenta una actitud de 312/70. La roca de caja corresponde a una diorita de textura equigranular con cristales de biotita y piroxeno (ver fig. N°4.7).

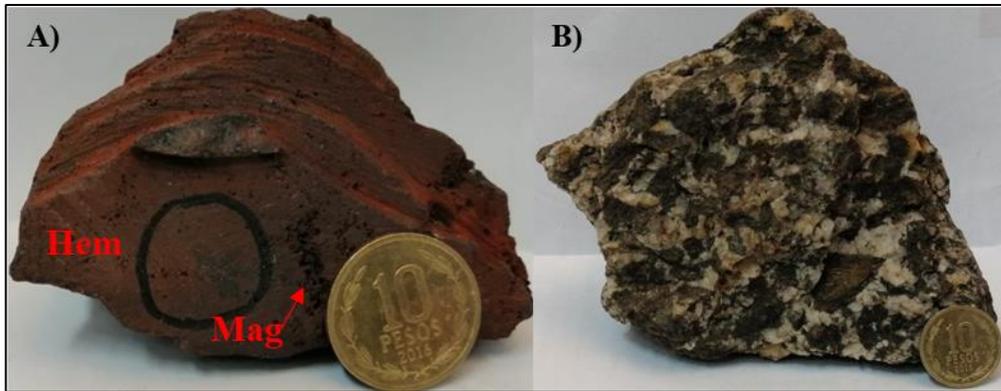


Figura N°4.7: Fotografías de muestras de mano representativas del sector 6. A) Muestra de mano de la veta de óxidos de hierro. B) Roca de caja correspondiente a diorita. Hem: Hematita, Mag: Magnetita. (Elaboración propia).

4.1.6 Sector 7

Coordenadas UTM:

358549 E 6973267 N

Descripción del sector: Labor minera subterránea activa posicionada al este de la ruta C-386 a la altura del km. 9 aproximadamente, en la cual, el cuerpo mineralizado se encuentra en forma de veta con actitud 145/68, presenta mineralización de óxidos de cobre (atacamita, crisocola y malaquita) principalmente y en menor cantidad minerales óxidos de hierro (hematita). La fig. N°4.8 ilustra las muestras representativas extraídas desde el sector.

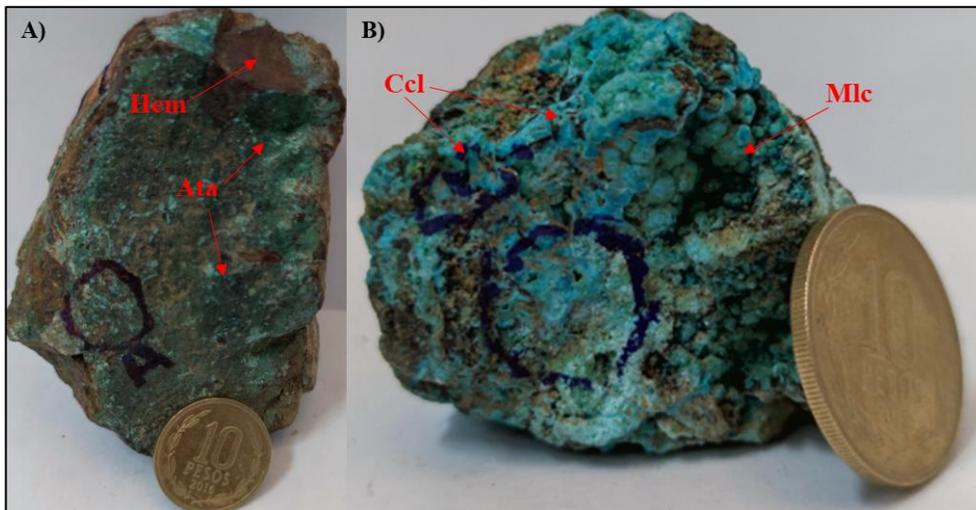


Figura N°4.8: Fotografías de muestras de mano representativas del sector 7. A) Muestra de mano código P7M2 B) Muestra de mano código P7M4. Hem: Hematita, Ata: Atacamita, Ccl: Crisocola, Mlc: Malaquita. (Elaboración propia).

4.1.7 Sector 8

Coordenadas UTM:

358329 E 6973434 N

Labor minera abandonada ubicada a 40 metros al norte del sector 7 en la que se expone un cuerpo masivo de magnetita alterado intensamente a hematita y jarosita. También presenta patinas de cuarzo granular. La fig. N°4.9 ilustra la muestra representativa extraída desde este sector.

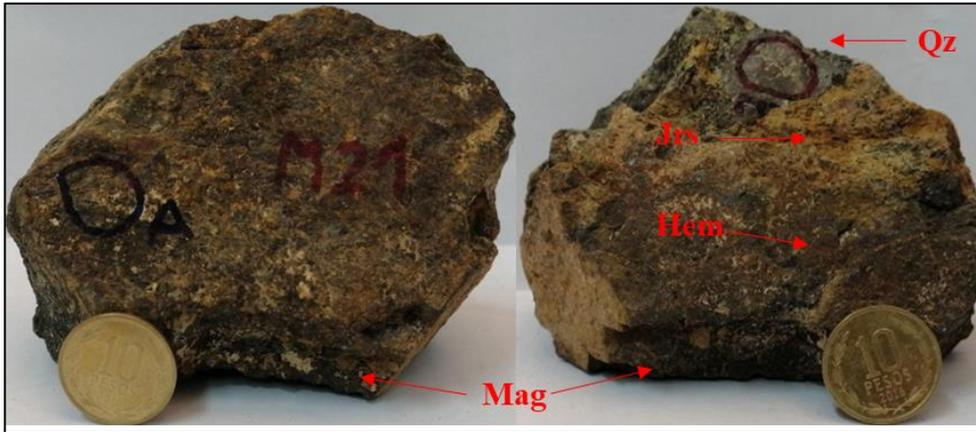


Figura N°4.9: Fotografías de muestra de mano representativa del sector 8. Mag: Magnetita, Hem: Hematita, Jrs: Jarosita, Qz: Cuarzo. (Elaboración propia).

4.1.8 Sector 10

Coordenadas UTM:

357950 E 6970981 N

Labor minera activa ubicada al oeste de la ruta C-386 a la altura del km. 12 aproximadamente. El cuerpo mineralizado presenta una morfología vetiforme compuesta de minerales óxidos de hierro (magnetita y hematita), de manera diseminada se observan silicatos de cobre (crisocola). La roca de caja corresponde a una diorita alterada a epidota y calcita.

La fig. N°4.10 ilustra las fotografías tomadas a la muestra P10M4 y sus secciones transparente y pulida correspondiente. Esta muestra presenta una mineralización de magnetita con cristales anhedral a subhedral, alterados muy levemente a hematita, en contacto con cristales de subhedral de epidota (pistacita y clinzoisita). También se observan cristales menores de cuarzo anhedral dispersos en la roca.

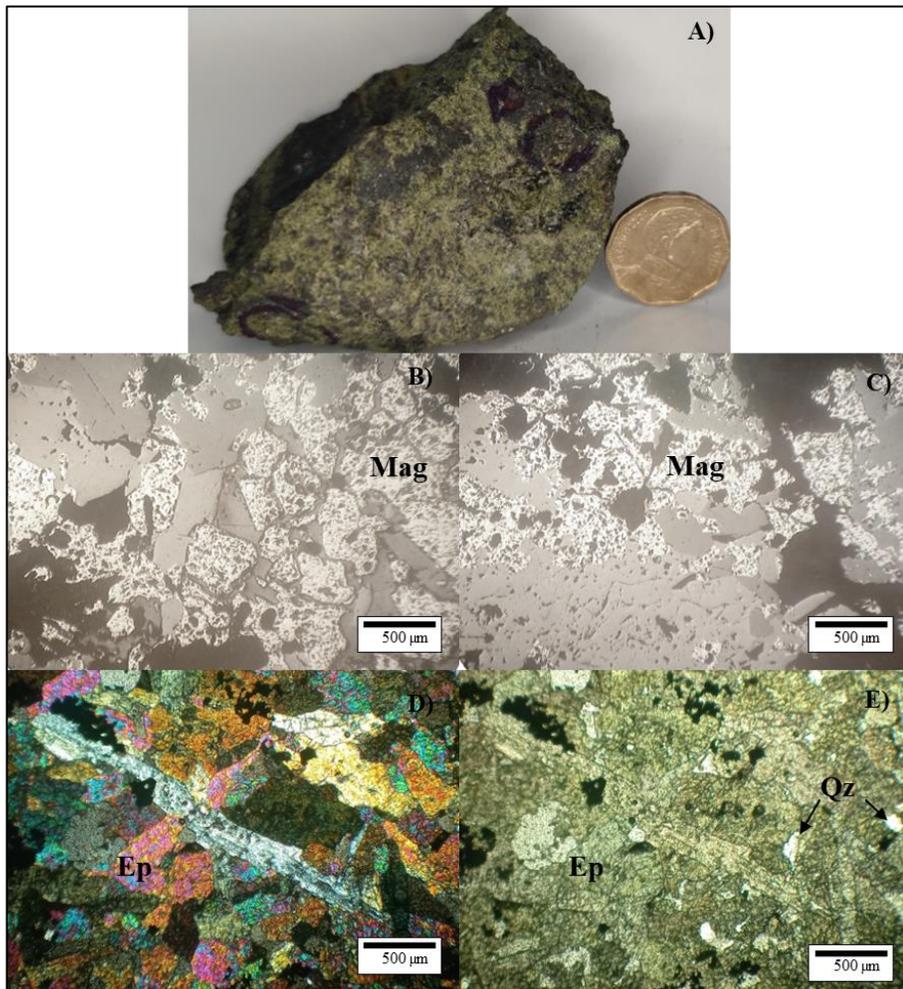


Figura N°4.10: Fotografías de muestra de mano y secciones pulida y transparente. A) Muestra de mano seleccionada. B) y C) Sección pulida en aumento 5x con luz polarizada plana. D) Sección transparente en aumento 5x con nicoles cruzados E) mismo sector con luz polarizada plana. Mag: Magnetita, Ep: Epidota, Qz: Cuarzo. (Elaboración propia).

La fig. N°4.11 presenta las fotografías tomadas a la muestra P10M6 y sus secciones transparente y pulida correspondiente. La roca exhibe una mineralización masiva de magnetita con cristales anhedrales a subhedrales oxidados muy levemente a hematita. La alteración corresponde a epidotas subhedrales (pistacita y clinzoisita). Además se presenta mineralización menor de crisocola de manera diseminada y cuarzos subhedrales dispersos en la roca.

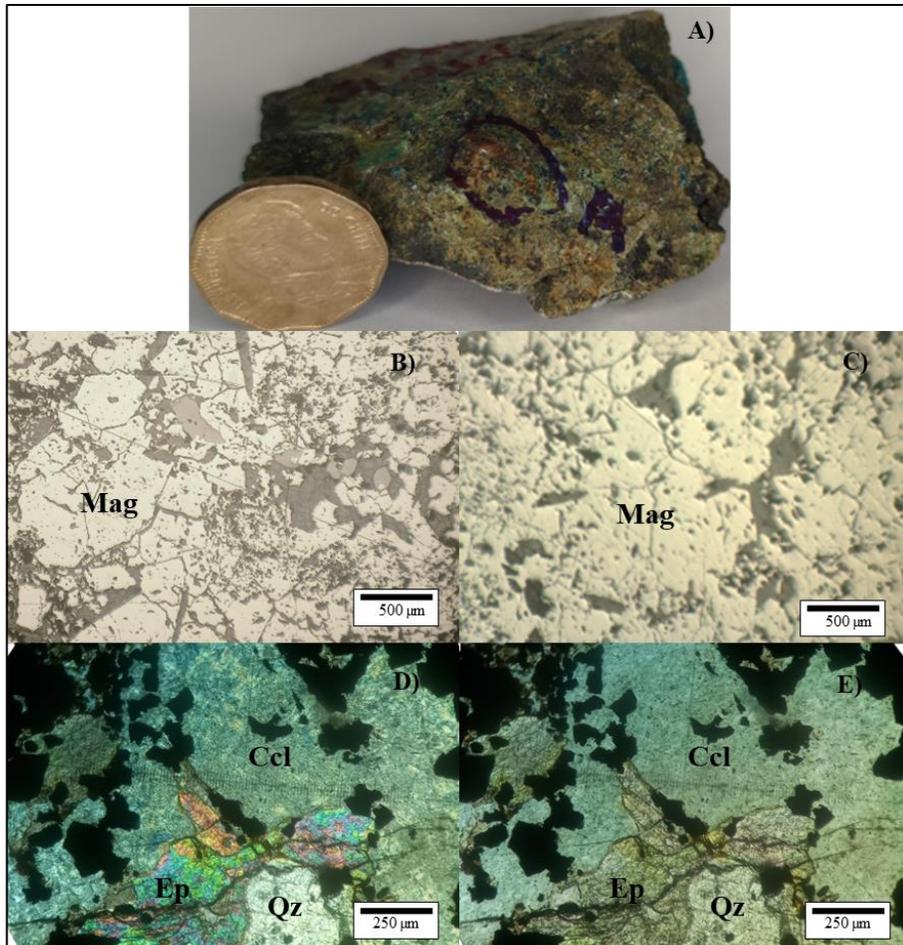


Figura N°4.11: Fotografías de muestra de mano y secciones transparente y pulida. A) Muestra de mano seleccionada. B) y C) Sección pulida en aumento 5x en luz polarizada plana. D) Sección transparente en aumento 10x con nicoles cruzados E) mismo sector con luz polarizada plana. Mag: Magnetita, Ccl: Crisocola, Ep: Epidota, Qz: Cuarzo. (Elaboración propia).

4.1.9 Sector 11

Coordenadas UTM:

358147 E 6970968 N

Labor minera activa ubicada aproximadamente a 20 metros al sur del sector 10. El cuerpo mineralizado se presenta con una morfología vetiforme con minerales óxidos de hierro (magnetita) alterados a jarosita, y crisocola de manera diseminada (ver fig. N°4.12). La roca de caja corresponde a una diorita con alterada a epidota y calcita. Adicionalmente se observa un mayor desarrollo en cristales de epidota los cuales alcanzan dimensiones de hasta 2-3 centímetros.

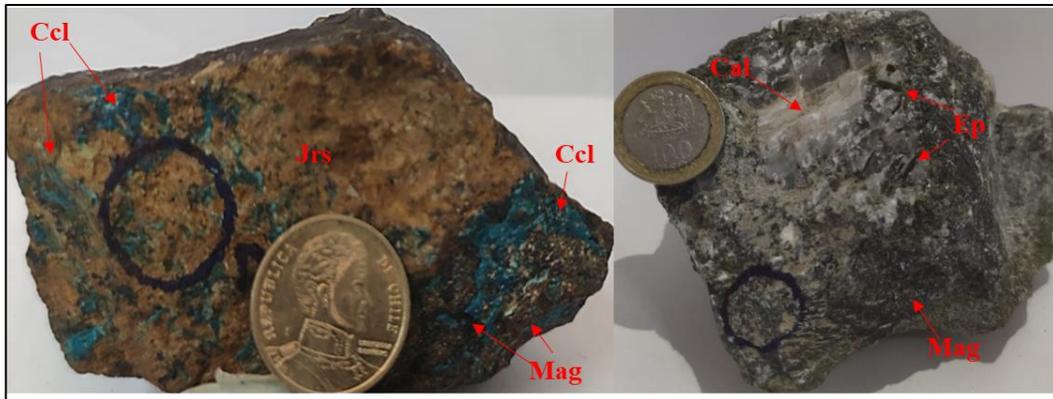


Figura N°4.12: Fotografías de muestras de mano representativas del sector 11. Cal: Calcita, Ccl: Crisocola, Ep: Epidota, Jrs: Jarosita, Mag: Magnetita. (Elaboración propia).

4.1.10 Sector 13

Coordenadas UTM:

361030 E 6963859 N

Labor minera abandonada posicionada al este de la ruta C-386 a la altura del km. 20 aproximadamente. En este sector se encuentra un cuerpo vetiforme mineralizado con óxidos de hierro (hematita y magnetita) acompañado de “óxidos de cobre” (crisocola y atacamita) de manera diseminada. Veta presenta una actitud de 246/70 y un ancho aproximado de 1,5 metros. Alrededor del cuerpo principal se observan vetas menores de cuarzo. Roca de caja no identificada.



Figura N°4.13: Fotografía de muestra de mano representativa del sector 13. Mag: Magnetita, Hem: Hematita, Ccl: Crisocola, Ata: Atacamita, Qz: Cuarzo. (Elaboración propia).

4.2 Geoquímica de elementos estratégicos

El equipo utilizado para los análisis geoquímicos detecta una variedad de 45 elementos por medio del método de elementos traza. Los resultados a continuación, se enfocan en graficar y comparar estadísticamente los siguientes elementos estratégicos: bismuto, cobalto, manganeso, níquel, vanadio e itrio. Debido a que estos elementos fueron detectados con mayor frecuencia en los análisis realizados.

La fig. N°4.14 ilustra y compara las concentraciones de elementos de interés (cobalto, manganeso, níquel, vanadio, itrio y bismuto) medidas en cada sector de la zona de estudio. Estas concentraciones se ilustran en % peso y partes por millón (ppm.). En esta figura destacan los valores de mediana de:

- Cobalto en los sectores 1 y 6 (0,121 y 0,200% peso respectivamente)
- Manganeso en los sectores 2 y 6 (0,301 y 0,343% peso respectivamente)
- Níquel en los sectores 1, 6 y 7 (670, 500 y 430 ppm. respectivamente)
- Vanadio en los sectores 1 y 8 (1120 y 725 ppm. respectivamente)
- Bismuto en los sectores 1 y 8 (490 y 315 ppm. respectivamente)
- Itrio en el sector 6 (90 ppm.)

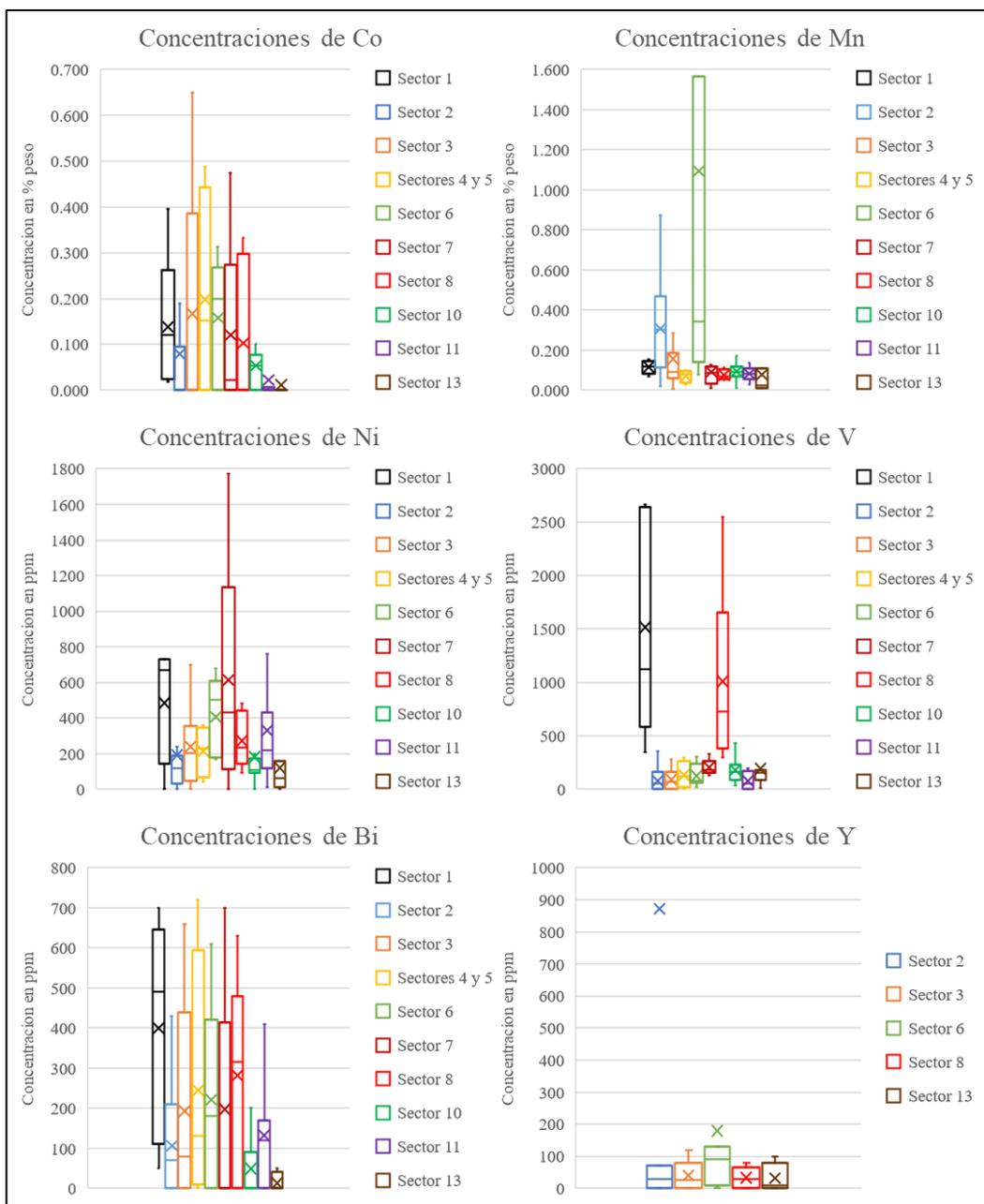


Figura N°4.14: Gráficos de caja y bigotes (Boxplot) ilustrando concentraciones de elementos de interés en %peso y partes por millón en cada sector de muestreo de la zona de estudio. (Elaboración propia).

Las tablas a continuación presentan los valores exactos por elemento en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) de la fig. N°4.14. Estos valores se encuentran en % peso y partes por millón (ppm.).

Concentraciones de cobalto (% peso)										
Sector	1	2	3	4 y 5	6	7	8	10	11	13
Extremo superior	0,396	0,190	0,649	0,488	0,314	0,474	0,334	0,100	-	-
Cuartil superior	0,262	0,094	0,385	0,442	0,269	0,275	0,298	0,077	0,006	-
Promedio	0,139	0,080	0,167	0,198	0,158	0,121	0,103	0,054	0,022	0,011
Mediana	0,121	-	-	0,153	0,200	0,023	-	0,054	-	-
Cuartil inferior	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
Extremo inferior	0,018	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla N°4.1: Tabla mostrando valores exactos de concentraciones de cobalto en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.14. (Elaboración propia).

Concentraciones de manganeso (% peso)										
Sector	1	2	3	4 y 5	6	7	8	10	11	13
Extremo superior	0,152	0,874	0,286	0,101	-	0,126	0,114	0,170	0,136	-
Cuartil superior	0,147	0,468	0,186	0,097	1,567	0,117	0,105	0,117	0,107	0,111
Promedio	0,116	0,307	0,157	0,070	1,094	0,091	0,076	0,094	0,083	0,078
Mediana	0,119	0,301	0,092	0,076	0,343	0,085	0,067	0,093	0,082	0,025
Cuartil inferior	0,084	0,113	0,061	0,038	0,140	0,037	0,054	0,068	0,054	0,012
Extremo inferior	0,070	0,017	0,004	0,028	0,079	0,011	0,051	0,010	0,029	0,009

Tabla N°4.2: Tabla mostrando valores exactos de concentraciones de manganeso en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.14. (Elaboración propia).

Concentraciones de níquel (ppm)										
Sector	1	2	3	4 y 5	6	7	8	10	11	13
Extremo superior	-	240	700	360	680	1170	480	200	760	-
Cuartil superior	730	190	357	347	610	1135	442	175	430	160
Promedio	484	191	238	215	407	613	271	181	330	120
Mediana	670	120	205	230	500	430	235	110	220	60
Cuartil inferior	145	0	45	67	180	115	142	90	120	10
Extremo inferior	0	-	0	40	170	0	90	0	10	0

Tabla N°4.3: Tabla mostrando valores exactos de concentraciones de níquel en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.14. (Elaboración propia).

Concentraciones de vanadio (ppm)										
Sector	1	2	3	4 y 5	6	7	8	10	11	13
Extremo superior	2670	360	280	300	310	330	2550	430	200	-
Cuartil superior	2645	160	160	265	240	265	1657	235	170	180
Promedio	1516	78	91	135	125	205	1011	178	77	191
Mediana	1120	50	70	120	80	180	725	160	50	150
Cuartil inferior	585	0	0	20	60	155	382	90	0	90
Extremo inferior	350	-	-	0	20	130	300	40	-	10

Tabla N°4.4: Tabla mostrando valores exactos de concentraciones de vanadio en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.14. (Elaboración propia).

		Concentraciones de bismuto (ppm)								
Sector	1	2	3	4 y 5	6	7	8	10	11	13
Extremo superior	700	430	660	720	610	700	630	200	410	50
Cuartil superior	645	210	462	595	420	415	480	90	170	40
Promedio	400	106	217	245	221	197	281	48	131	12
Mediana	490	70	100	130	180	-	315	-	120	-
Cuartil inferior	110	0	0	10	0	0	0	0	0	0
Extremo inferior	50	-	-	0	-	-	-	-	-	-

Tabla N°4.5: Tabla mostrando valores exactos de concentraciones de bismuto en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.14. (Elaboración propia).

		Concentraciones de itrio (ppm)				
Sector	2	3	6	8	13	
Extremo superior	-	120	-	80	100	
Cuartil superior	70	80	130	65	80	
Promedio	872	40	178	33	31	
Mediana	30	25	90	30	10	
Cuartil inferior	0	0	10	0	0	
Extremo inferior	-	-	0	-	-	

Tabla N°4.6: Tabla mostrando valores exactos de concentraciones de itrio en cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.14. (Elaboración propia).

La fig. N°4.15 muestra de manera grafica que elementos, basado en su valor de mediana, se encuentran en concentraciones anómalas en los sectores de muestreo a lo largo de la zona de estudio. También se ilustran los valores de mediana en partes por millón (ppm.) al costado de cada elemento.

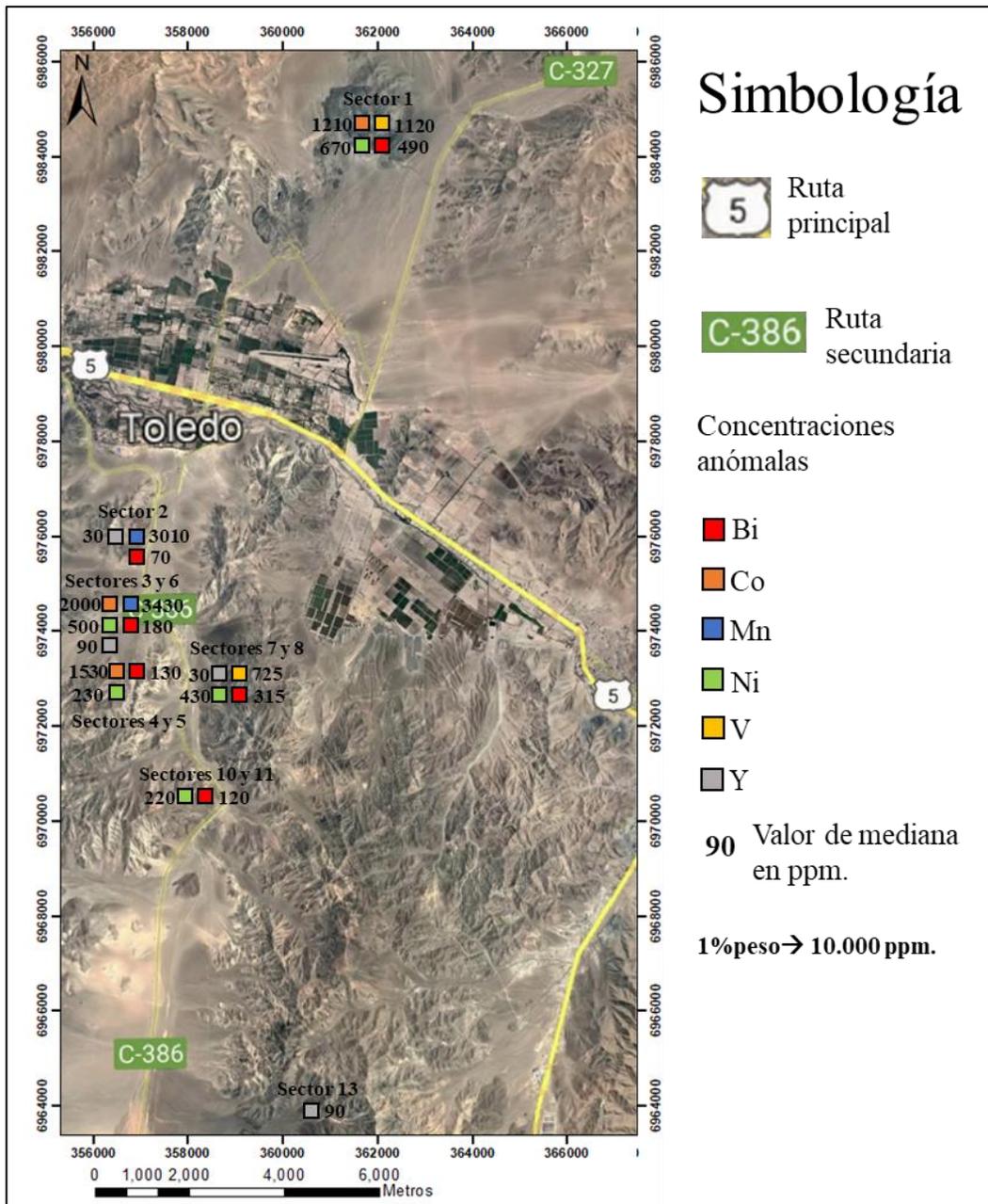


Figura N°4.15: Mapa geoquímico del sector de estudio ilustrando sectores de muestreo con elementos de interés en concentraciones anómalas (valores de mediana en partes por millón). (Elaboración propia).

Los gráficos de caja y bigotes (Boxplot) agrupados en la fig. N°4.16 ilustran las concentraciones de elementos de interés a nivel general en la zona de estudio. Estas concentraciones se presentan en % peso y en partes por millón (ppm.) y fueron realizadas a partir de las mediciones mayores a 0 de cada elemento.

En los gráficos destacan las concentraciones (en % peso) máxima 0,286, mediana 0,098 y mínima 0,004 de manganeso. Por otro lado, respecto al cobalto sus concentraciones (en % peso) máxima y mínima son de 0,672 y 0,006 respectivamente, en tanto su mediana es de 0,127. El vanadio presenta concentraciones (en ppm.) máximas y mínimas de 480 y 10 respectivamente y una mediana de 170. Por su parte, el níquel se observa en concentraciones máximas y mínimas de 920 y 10 ppm. correspondientemente y una mediana de 200 ppm. El itrio alcanza una concentración máxima de 170 ppm. y mínima de 10 ppm., en tanto su mediana es de 45 ppm. Por último, el bismuto se observa con una concentración máxima de 720 ppm. y mínima de 30 ppm., y una mediana de 210 ppm. Para mayor detalle en los valores exactos de cada porción en los gráficos, observar la tabla N°4.7.

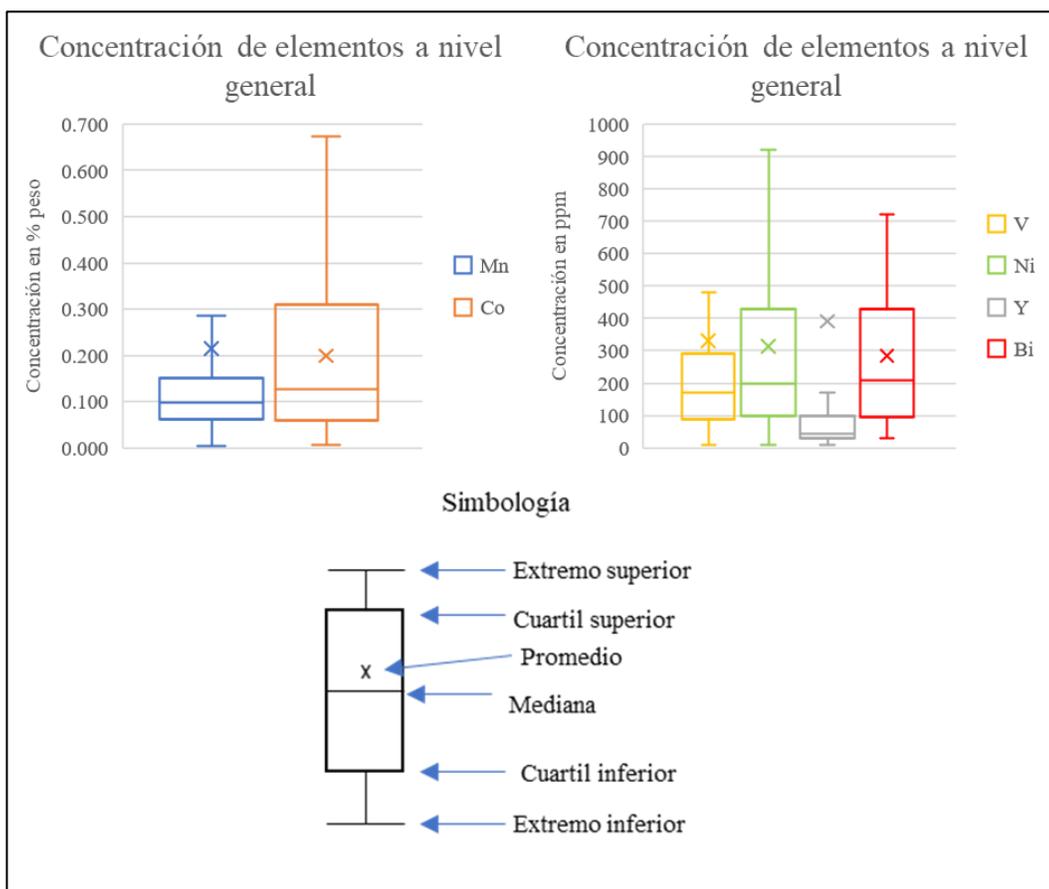


Figura N°4.16: Gráficos de caja y bigotes (Boxplot) ilustrando las concentraciones en % peso y partes por millón (ppm) de elementos de interés detectados en la zona de estudio. (Elaboración propia).

	Mn %peso	Co %peso	V ppm	Ni ppm	Y ppm	Bi ppm
Extremo superior	0,286	0,672	480	920	170	720
Cuartil superior	0,152	0,310	290	430	97	430
Promedio	0,214	0,200	331	313	390	284
Mediana	0,098	0,127	170	200	45	210
Cuartil inferior	0,062	0,059	90	100	30	95
Extremo inferior	0,004	0,006	10	10	10	30

Tabla N°4.7: Tabla mostrando valores exactos de cada porción de los gráficos de caja y bigote (Boxplot) ilustrados en la fig. N°4.16. (Elaboración propia).

Si bien se realizaron un total de 87 análisis geoquímicos, las detecciones de cada elemento de interés fueron variadas. Estas se especifican a continuación:

- Mn: 87 detecciones
- Co: 41 detecciones
- V: 71 detecciones
- Ni: 81 detecciones
- Y: 40 detecciones
- Bi: 49 detecciones

4.3 Correlación entre elementos

Los gráficos binarios a continuación presentan los resultados relacionados a la correlación de los elementos encontrados en el estudio. Los valores de concentración se encuentran en % peso.

En la fig. N°4.17 se observa el grado de correlación entre hierro (Fe) y los elementos de interés de este estudio. En los gráficos correspondientes a B), C), D) y E), se observa una alta dispersión de los datos. Por otro lado, en los gráficos correspondientes a A) y F) se observa una tendencia positiva en concentraciones de 25% peso hierro (Fe).

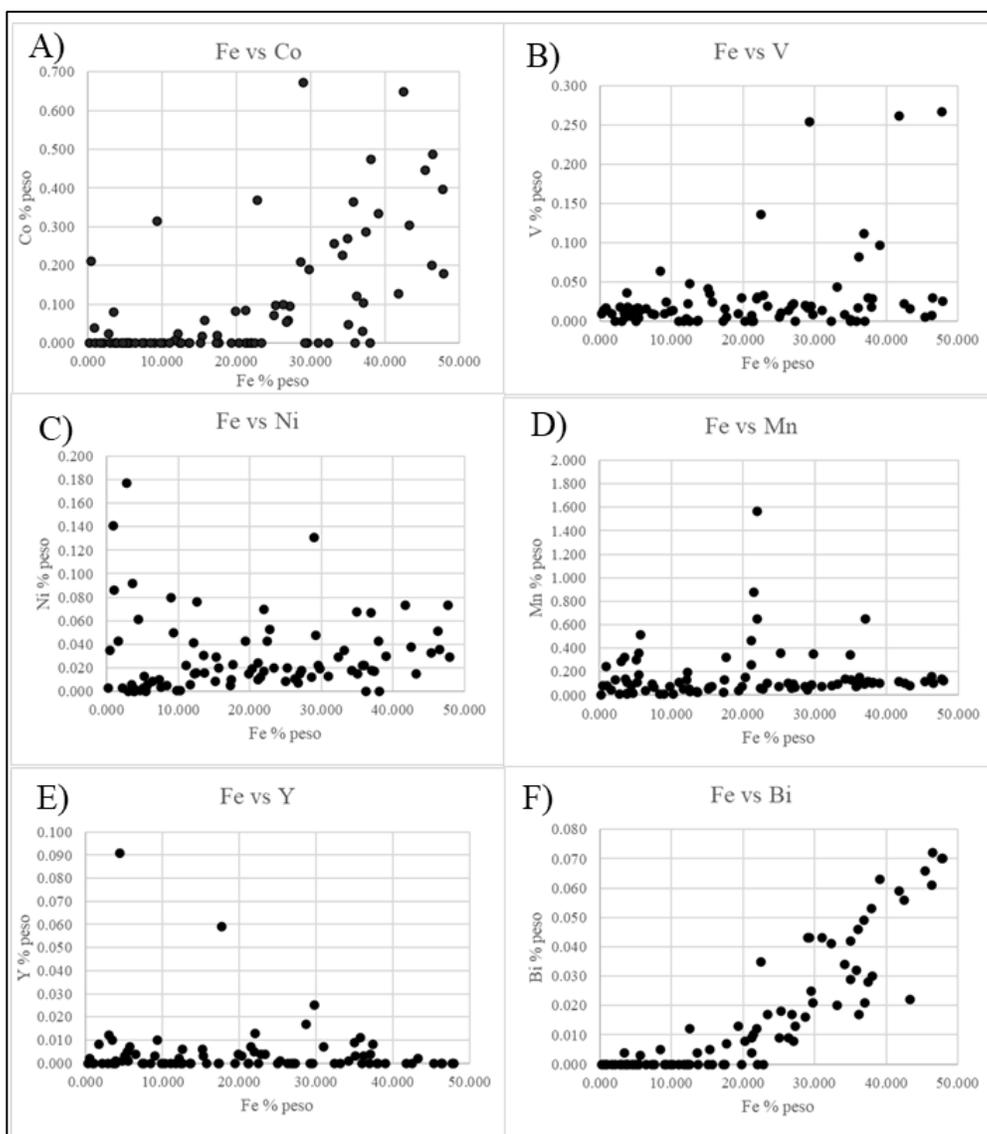


Figura N°4.17: Gráficos binarios ilustrando el grado de correlación entre hierro y elementos de interés medidos en % peso en la zona de estudio. (Elaboración propia).

La fig. N°4.18 ilustra el grado de correlación entre cobre (Cu) y los elementos de interés de este estudio. Los gráficos ilustran que la correlación entre los elementos es nula, además los datos tienden a agruparse en su mayoría en concentraciones de cobre (Cu) menores al 10% peso.

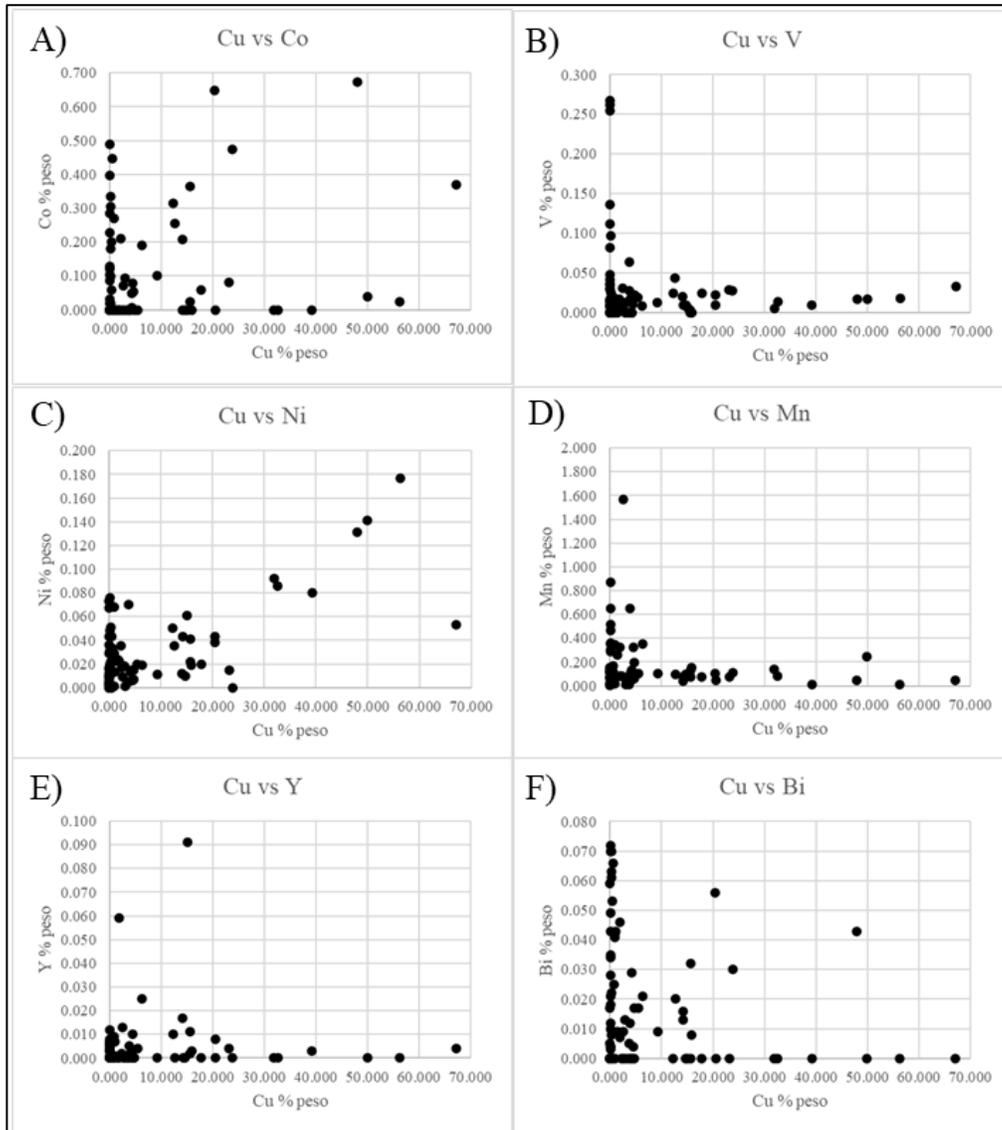


Figura N°4.18: Gráficos binarios ilustrando el grado de correlación entre cobre y elementos de interés medidos en % peso en la zona de estudio. (Elaboración propia).

Los gráficos de la fig. N°4.19 ilustran la correlación entre SiO₂ y los elementos de interés. Estos gráficos ilustran una fuerte dispersión en los datos, además de una nula correlación entre ellos.

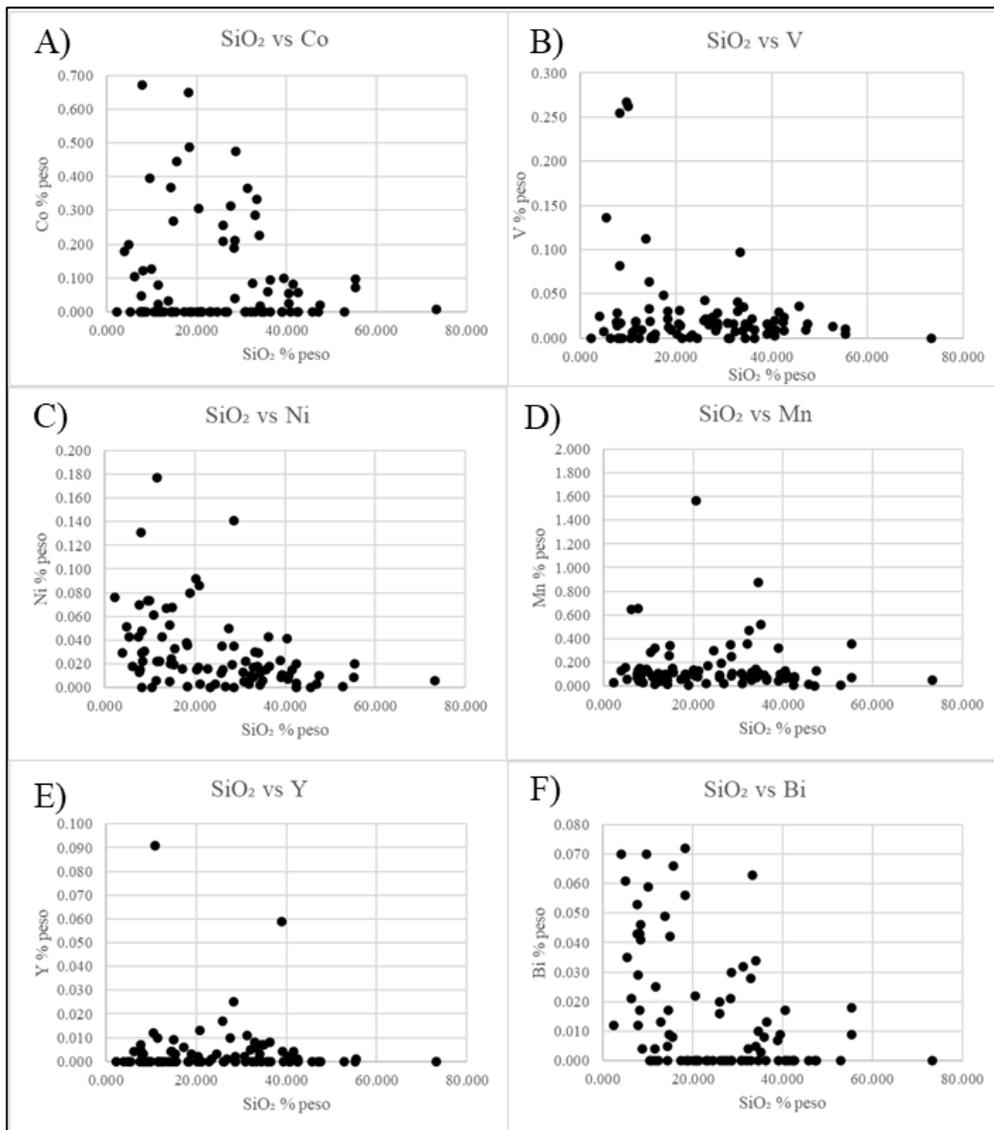


Figura N°4.19: Gráficos binarios ilustrando el grado de correlación entre SiO₂ y elementos de interés medidos en % peso en la zona de estudio. (Elaboración propia).

La fig. N°4.20 muestra la correlación entre Al_2O_3 y los elementos de interés del estudio. En general los gráficos muestran una correlación nula entre los elementos. Además se observa una fuerte dispersión en los gráficos A), C) y F).

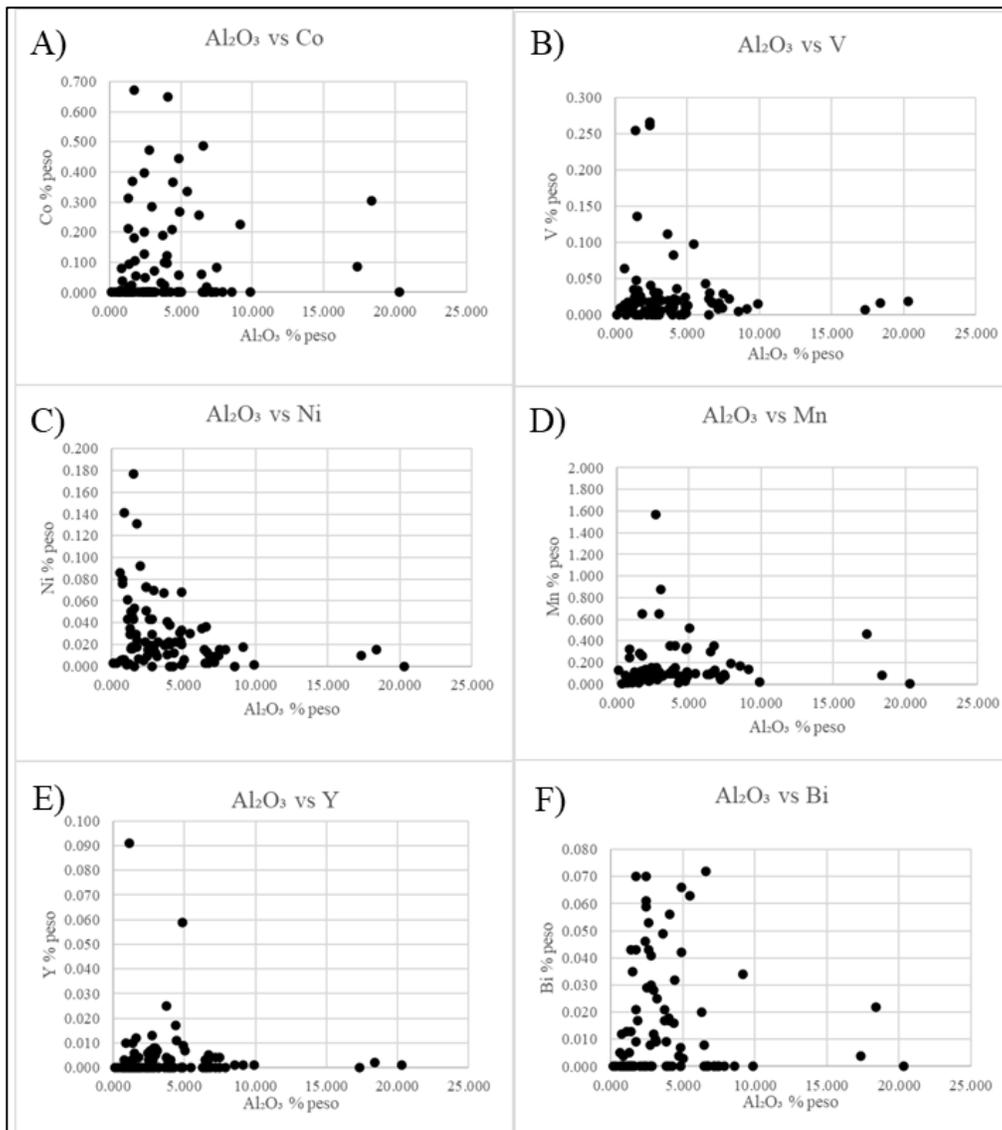


Figura N°4.20: Gráficos binarios ilustrando el grado de correlación entre Al_2O_3 y elementos de interés medidos en % peso en la zona de estudio. (Elaboración propia).

La fig. N°4.21 ilustra la correlación entre MgO y los elementos de interés de este estudio. Los gráficos A), C) y F) muestran una alta dispersión de datos, sin poder observarse una tendencia positiva o negativa. Por otro lado, en los gráficos B), D) y E) si bien los datos son menos dispersos, no se observa una clara correlación entre los elementos graficados.

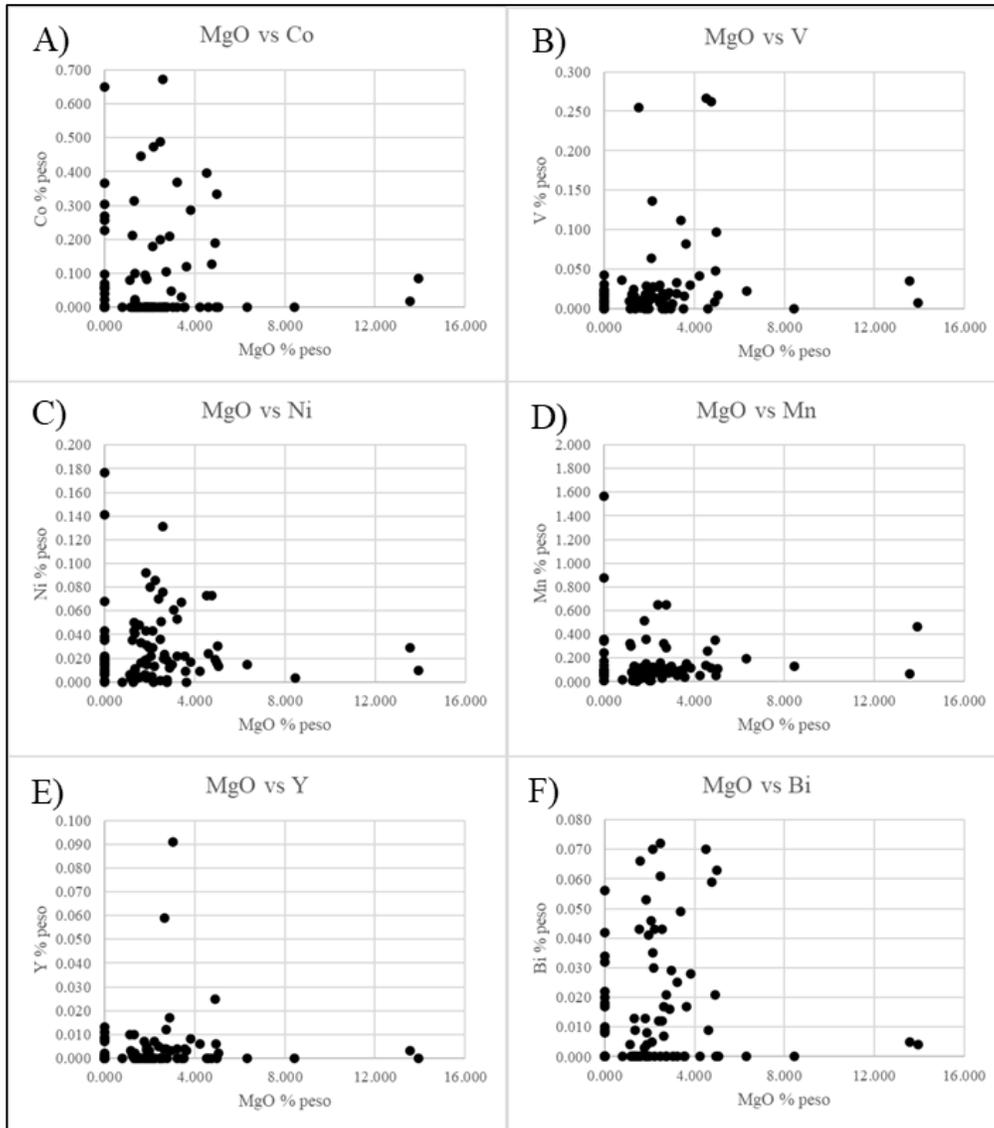


Figura N°4.21: Gráficos binarios ilustrando el grado de correlación entre MgO y elementos de interés medidos en % peso en la zona de estudio. (Elaboración propia).

Capítulo 5: Discusión

5.1 Análisis e interpretación a nivel general de la zona de estudio

A nivel general en la zona de estudio se presenta una gran variedad de elementos dentro de los cuales destacan el bismuto, cobalto, manganeso, níquel, vanadio e itrio. Las concentraciones promedio medidas de estos elementos en la zona de estudio superan los valores de concentración promedio en la corteza continental señalados por autores como Rudnick y Gao (2003), Ridley (2013) y Kloprogge et al., (2020) (ver tabla N°5.1). Por tanto, estos pueden ser considerados como valores anómalos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los valores promedios presentados en esta tabla representan solo aquellas muestras con valores mayores a 0 del elemento medido.

Al momento de analizar los valores promedio de estos elementos se observa que algunos de ellos (manganeso, vanadio e itrio) se ubican fuera del rango de su respectiva caja (ver fig. N°4.14), esto ocurre debido a la detección de valores atípicos no visibles en el gráfico, los cuales influyen fuertemente en el valor del promedio aritmético. Debido a esto, un valor más confiable para denotar el verdadero comportamiento de la concentración de elementos a nivel general podría corresponder a la mediana. De igual manera que los valores promedio aritmético, la mediana de los elementos señalados también supera o iguala las concentraciones medidas en la corteza terrestre, por lo cual, podrían ser consideradas como anómalas.

Elemento	Concentración promedio en corteza terrestre (ppm)			
	Rudnick y Gao (2003)	Ridley (2013)	Kloprogge et al. (2020)	En este estudio
Bi	0,18	0,2	0,02	284
Co	26,6	25	25	2000
Ni	59	75	111	313
Mn	1000	950	980	2140
V	138	135	143	331
Y	19	33	31	390

Tabla N°5.1: Tabla indicando concentraciones promedio de elementos en la corteza terrestre y concentraciones promedio en este estudio. (Elaboración propia. Fuentes citadas en la tabla).

El contenido de elementos pertenecientes al grupo denominado tierras raras no es muy variado según los resultados obtenidos. A las 40 detecciones de itrio se le suman 5 de cerio y 1 de lantano, en tanto, otros elementos de este grupo no presentan valores positivos. Esto probablemente se relacione a que se podrían concentrar en valores menores al límite de detección del equipo utilizado para los análisis.

Un factor importante que influiría en los valores obtenidos es el número de detecciones del elemento, en ese ámbito los elementos más frecuentemente detectados fueron el

manganeso, el níquel y el vanadio, los cuales fueron detectados en casi todos los análisis realizados a las distintas muestras a diferencia de lo que ocurre con elementos como bismuto, cobalto e itrio los cuales fueron detectados en rangos cercanos a la mitad del total de análisis químicos.

Otros elementos en concentraciones considerables son hafnio y rubidio, sin embargo, estos no son incluidos en ningún estudio de elementos ya sea estratégicos y/o críticos por los cual no se tomaron en cuenta al momento de realizar los análisis estadísticos.

Por otro lado, en el caso de elementos como torio y uranio, estos solo presentaron valores considerables en el sector 7. En ese ámbito, la muestra P7M2 presenta concentraciones (en % peso) de torio y uranio de 0,276 y 0,025 respectivamente. De igual manera, la muestra P7M4 exhibe concentraciones (en % peso) de torio y uranio de 0,197 y 0,020 respectivamente. Estas muestras también se caracterizan por poseer un alto contenido en minerales de cobre (ver fig. N°4.8). Por lo cual, en este sector, elementos como uranio y torio podrían estar relacionadas al alto contenido en minerales de cobre. Sin embargo, se requiere una mayor cantidad de muestras de este sector para observar si es correcta esta relación. (Para mayor información sobre la diversidad de elementos medidos ver tabla geoquímica adjunta en la sección anexo).

5.2 Análisis e interpretación por sector de la zona de estudio

Cada sector de muestreo presenta variados elementos y en concentraciones heterogéneas. Dado esto la fig. N°5.1 ilustra las agrupaciones de sectores en zonas para facilitar su análisis. Esta agrupación se basa en las similitudes de las características (tipo de mineralización, morfología del cuerpo mineralizado y roca de caja) del sector y la cercanía de los sectores de muestreo.

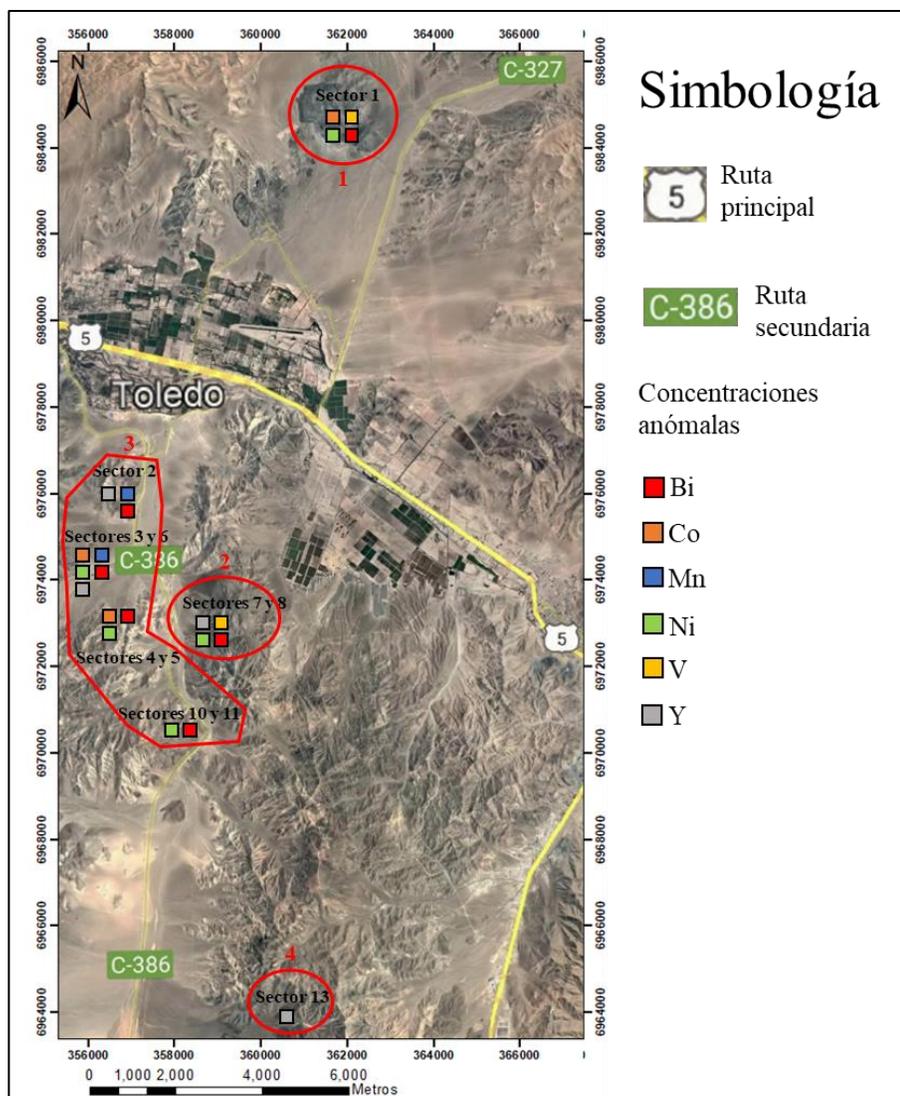


Figura N°5.1: Mapa del sector de estudio con elementos de interés en concentraciones anómalas. Figuras en rojo y números indican a que zona corresponde cada sector de muestreo. (Elaboración propia).

Zona 1:

Esta zona corresponde al sector mina “Bellavista”, caracterizada por un cuerpo masivo de óxidos de hierro alojados en rocas andesitas correlacionables a la Formación La Negra. En general el sector destaca por contener altos valores en casi todos los elementos de interés. Respecto a elementos como cobalto y níquel sus medianas (1210 y 670 ppm. respectivamente) y promedios (1390 y 484 ppm. respectivamente) superan ampliamente los valores de concentración de cobalto (25 ppm.) y níquel (111 ppm.) en la corteza terrestre señalados por Klopogge et al., (2020) (ver tabla N°5.1 para otros valores de concentración en corteza terrestre). Además en este sector se encuentran los valores de mediana más altos de vanadio (1120 ppm.) y bismuto (490 ppm.) de la zona de estudio, estos elementos podrían estar relacionados al alto contenido en hierro del sector. En el

caso del bismuto esta correlación se observa en la fig. N°5.1 B), pero en el caso del vanadio, si bien no hay una fuerte correlación, estudios como el de Elgueta (1991) proponen que este elemento está ligado a la alta concentración de hierro. Por último, no se detectó ningún elemento del grupo tierras raras, probablemente estos elementos se encuentran en concentraciones menores al límite de detección del equipo utilizado.

Zona 2:

En esta zona se encuentran los sectores 7 y 8, ubicados al este de la ruta C-386. Corresponden a cuerpos mineralizados con óxidos de hierro (magnetita y hematita) y minerales de cobre (atacamita, malaquita, crisocola). Destacan sus altos valores de mediana de níquel (430 ppm.), vanadio (725 ppm.) y bismuto (315 ppm.), además de concentraciones no menores de itrio (30 ppm.). Por otro lado, las muestras M2 y M4 del sector 7 presentan concentraciones altas de elementos como torio (0,276 y 0,197% peso) y uranio (0,025 y 0,020% peso). Posiblemente estos elementos estén ligados al alto contenido en cobre de estas muestras (56,279 y 49,937% peso), sin embargo, se requiere un mayor número de muestras con estas características para determinar si esta relación es correcta. En cuanto a los valores de itrio, estos destacan principalmente en el sector 8 donde este elemento fue detectado en 3 veces con una mediana de 30 ppm., en cambio en el sector 7 solo en una de las muestras se detectó este elemento.

Zona 3:

Esta zona incluye los sectores 2, 3, 4, 5, 6, 10 y 11, ubicados al oeste de la ruta C-386. Corresponden a cuerpos vetiformes mineralizados con óxidos de hierro (magnetita y hematita) principalmente y en segundo orden minerales de cobre (crisocola y atacamita), alojados en rocas dioritas y milonitas. Estos cuerpos hospedan una gran variedad de elementos de interés en concentraciones anómalas, de los cuales destacan las concentraciones de níquel con una mediana de 500 y 220 ppm. en los sectores 6 y 11 respectivamente. De igual manera destaca el itrio con una mediana de 90 y 30 ppm. en los sectores 6 y 2 respectivamente. En cuanto a las concentraciones de níquel, destacan los sectores 3 y 6 con los valores de mediana más altos de toda la zona (230 ppm. en el sector 3 y 500 ppm. en el sector 6). Por otro lado, los valores promedio de itrio son altos, en el sector 2 alcanza los 872 ppm., mientras que en el sector 6 el valor es de 178 ppm. Producto de esto, quedan fuera del rango de la caja, estos son afectados por valores atípicos no mostrados en el gráfico, por lo cual los valores de mediana pueden ser considerados como más adecuados en el comportamiento real de la concentración de este elemento. En cuanto a las concentraciones de cobalto, en el sector 6 se observan los mejores valores de este elemento con una mediana de 2000 ppm., también en los sectores 4 y 5 con una mediana de 1530 ppm. Sin embargo, en los sectores 4 y 5, los valores deben ser tomados con cautela debido a que las muestras obtenidas de este sector fueron escasas por lo cual podrían estar sobreestimando las concentraciones.

Zona 4:

El sector 13 correspondiente a esta zona se ubica en el sector Sierra Jesús María y exhibe las más escasas concentraciones de elementos de interés, donde solo destacan los valores de itrio con una mediana de 90 ppm. en las muestras analizadas. Los pobres resultados obtenidos en este sector podrían estar relacionados al bajo contenido en hierro de las muestras obtenidas. Por otro lado, de manera similar a las muestras analizadas del sector 7, la muestra P13M3 presenta valores considerables de torio y uranio (0,031 y 0,032% peso respectivamente) posiblemente relacionado a un alto contenido en cobre (20,522% peso) en el punto de la muestra analizado. Sin embargo, se requiere una mayor cantidad de muestras con características similares para realizar correlaciones.

Respecto a las muestras analizadas tanto a nivel macroscópico como microscópico muestran que la mineralización principal es de óxidos de hierro en la cual la magnetita exhibe distintos grados de martitización dependiendo del sector de muestreo. En ese ámbito las muestras de los sectores 3, 4 y 5 muestran que la magnetita ha sido casi en su totalidad alterada a hematita (ver figs. N°4.4-4.6), esto podría relacionarse a una mayor exposición a condiciones oxidantes dada su cercanía a la traza principal del Sistema de Fallas Atacama. Además de la mineralización principal de óxidos de hierro, se encuentran minerales de cobre (crisocola, atacamita y malaquita) ocurriendo de manera diseminada y en vetillas rellenas de cuarzo, sin embargo los sectores 1, 6 y 8 presentan menores concentraciones de este elemento posiblemente relacionado a una menor circulación de fluidos respecto a los otros sectores estudiados. Por otro lado, los minerales de alteración más comunes corresponden a epidota, calcita, actinolita y arcillas afectando principalmente a plagioclasas y minerales componentes de las rocas de caja. Estos minerales de alteración se asocian a depósitos tipo IOCG o IOA según explican Sillitoe (2003), Williams et al., (2005) y Grooves et al., (2010).

En relación a los elementos de interés de este estudio (bismuto, cobalto, manganeso, níquel, vanadio y tierras raras) todos ellos se encuentran en concentraciones a nivel traza en las muestras analizadas, debido a esto no fue posible identificar minerales en los que la mena principal fueran estos elementos, por lo tanto es probable que estos se encuentren incorporados en la red cristalina de minerales ricos en hierro como son la magnetita o hematita. En ese contexto, Nadoll et al., (2014) explica que los elementos siderófilos y litófilos poseen radios iónicos similares a los cationes Fe^{2+} y Fe^{3+} y dado esto son fácilmente incorporados en la estructura cristalina de la magnetita. Por otro lado, relacionado a las tierras raras Frietsch y Perdahl (1995) señalan que estos elementos tienden a estar incluidos en la estructura cristalina de apatitos, reemplazando al catión Ca^{2+} . La falta de variedad de tierras raras podría estar relacionada a la baja o nula cantidad de apatitos en las muestras analizadas. Sin embargo, dada la escala de estudio y el tipo de análisis geoquímicos realizados no es posible establecer claramente el mecanismo por el cual estos elementos ocupan los espacios en la red cristalina.

A partir de las concentraciones de elementos de interés visibles en la fig. N°4.14 y su distribución a lo largo de la zona de estudio ilustrada en la fig. N°4.15, es posible observar

que todos los sectores, a excepción del sector 13, presentan una amplia variedad de estos elementos. Sin embargo, ninguno de estos elementos podría ser recuperado como mena principal dadas sus concentraciones y por las dimensiones de los cuerpos mineralizados, por tanto estos elementos deberían ser recuperados como subproductos de menas principales. Por otro lado, el sector 1 correspondiente a mina “Bellavista” puede ser considerado como un cuerpo mineralizado excepcional, en comparación a los otros sectores estudiados, dadas sus dimensiones y variedad en contenido y concentración respecto a los elementos analizados en este estudio. Respecto a los sectores pertenecientes a la zona 3, probablemente podría ser más económicamente rentable explotarlos juntos, dadas sus características vetiformes y la variedad en contenido y concentración de elementos.

En relación a la génesis de los elementos estratégicos detectados en la zona de estudio, Diaz et al., (2003) explican que los depósitos pertenecientes a la Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa ubicados entre los 26-28°S se asocian a un intenso magmatismo ocurrido durante el Cretácico inferior (132-95 Ma.). Estos depósitos fueron formados en 4 eventos principales de mineralización atribuidos al emplazamiento de cuerpos plutónicos en el sector. En ese contexto, Arevalo (2005) relaciona genéticamente el primer y segundo eventos de mineralización (ocurridos entre los 132-119 Ma.), al emplazamiento de los plutones Sierra Chicharra y Diorita La Brea. Estos cuerpos intrusivos ígneos, dada su cercanía a los cuerpos mineralizados de la zona de estudio, corresponderían a las principales fuentes de fluidos hidrotermales ricos en estos elementos (cobalto, níquel, vanadio, entre otros). A su vez, en el sector de estudio se encuentra la traza principal del Sistema de Fallas Atacama, por lo cual, este sistema estructural también tendría un rol clave en la circulación de estos fluidos hidrotermales, dadas las características vetiformes de los cuerpos mineralizados.

5.3 Análisis de correlaciones

En general los resultados de correlación correspondientes a los gráficos binarios de las figuras N°4.17-4.21 son altamente dispersos. Por lo cual, la correlación entre los elementos graficados podría ser baja o podría no seguir una tendencia lineal. Sin embargo, algunos elementos si presentan una buena correlación, por ejemplo en el gráfico binario correspondiente a la figura N°5.2 el cual ilustra el comportamiento de Fe vs Co, si bien los datos son dispersos, a medida que la concentración de hierro se acerca a 25% (datos encerrados en cuadro azul) las concentraciones de cobalto tienden a aumentar, en cambio con concentraciones menores al 25 % las concentraciones de cobalto son casi nulas. Por otro lado, en la misma figura la sección B) el cuadro de color azul denota que a concentraciones alrededor del 25% de hierro el contenido en bismuto tiende a ser mayor. Por tanto, el mayor contenido de cobalto y bismuto podría estar controlado por la concentración de óxidos de hierro.

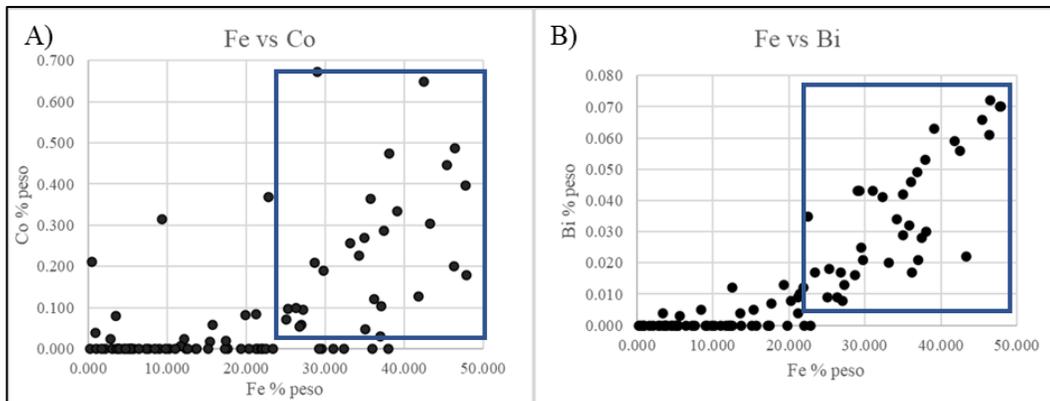


Figura N°5.2: Gráficos binarios de los elementos estudiados. A) Gráfico binario de Fe vs Co. B) Gráfico binario de Fe vs Bi. (Elaboración propia).

En cuanto al comportamiento de níquel y cobalto respecto a cobre, reflejados en los cuadros azules de la fig. N°5.3, muestra que la mayor concentración de estos tiende a estar limitado a valores alrededor del 10-15%. Lo cual sugiere que estos elementos tenderían a concentrarse mayormente en bajos valores de cobre.

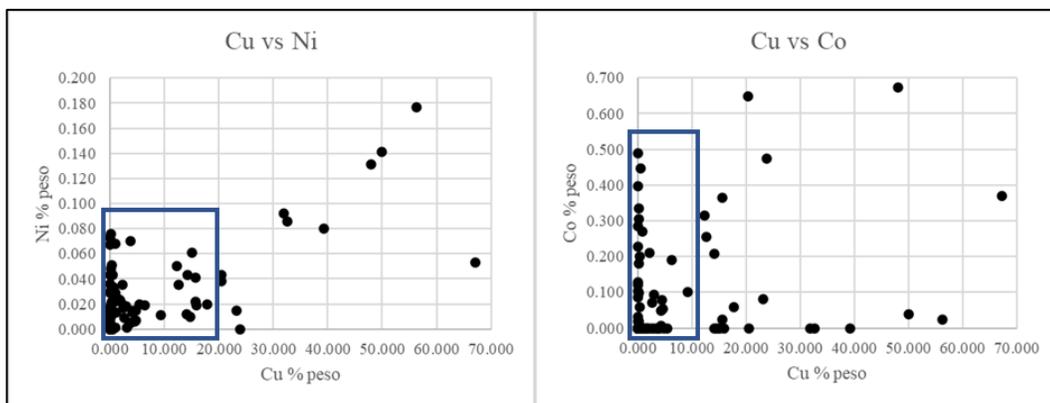


Figura N°5.3: Gráficos binarios ilustrando el comportamiento de níquel y cobalto vs cobre. (Elaboración propia).

Elementos como vanadio, manganeso e itrio según los gráficos realizados no indican una dependencia clara con otros elementos. Si bien estudios como el de Elgueta (1991) y Kelley et al., (2017) señalan que el vanadio se encuentra fuertemente ligado a la concentración de hierro, en los depósitos ubicados en la zona de estudio los datos graficados no muestran una tendencia entre estos elementos. De igual manera los datos de manganeso e itrio se observan demasiado dispersos y no muestran una correlación en los gráficos binarios realizados. Probablemente el comportamiento de estos elementos sea independiente de los elementos con los que fueron graficados o se requiera una mayor cantidad de muestras para evidenciar su comportamiento.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Las principales menas del sector de estudio corresponden a óxidos de hierro en cuerpos vetiformes o masivos. En segundo orden, minerales clasificados como “óxidos de cobre” ocurriendo de manera diseminada.
- Los minerales de alteración más comunes en la zona son: epidota, calcita, actinolita y arcillas de hierro.
- En base a los dos puntos anteriores, los depósitos estudiados pueden ser considerados como depósitos tipo IOCG o IOA.
- Asociado a las menas principales, la zona de estudio hospeda una amplia variedad de elementos considerados estratégicos y/o críticos. Dentro de los cuales destacan: bismuto (mediana: 210 ppm.), cobalto (mediana: 1270 ppm.), níquel (mediana: 200 ppm.), manganeso (mediana: 980 ppm.), vanadio (mediana: 170 ppm.) e itrio (mediana: 45 ppm.). Todos ellos en concentraciones anómalas.
- Estos elementos se presentan en concentraciones a nivel traza asociados principalmente a altos valores de hierro en las rocas analizadas, por tanto su recuperación debiera ser como subproductos de menas primarias (óxidos de hierro y/o cobre).
- Cada sector de muestreo contiene diversos elementos en concentraciones variadas. Por ejemplo en el caso de cobalto los mejores valores corresponden a los sectores 1, 6, 4 y 5 (sus valores de mediana son 1210, 2000 y 1530 ppm. respectivamente). Respecto al manganeso los sectores 2 y 6 presentan las concentraciones más altas con medianas de 3010 y 3430 ppm. respectivamente. En tanto los valores de níquel se presentan altos en todos los sectores a excepción de los sectores 2 y 13 (menores a 120 ppm.). Por otro lado las mejores concentraciones de vanadio se encuentran en los sectores 1 y 8 con medianas de 1120 y 725 ppm. respectivamente.
- El bismuto se encuentra en altas concentraciones en todos los sectores de muestreo a excepción de los sectores 10 y 13 (menor a 50 ppm.). Este elemento presenta una estrecha relación a los altos valores de hierro en las rocas analizadas.
- Respecto a las tierras raras los únicos elementos detectados fueron itrio, lantano y cerio, sin embargo, estas detecciones no fueron uniformes en todos los sectores de muestro. De estos elementos solo destacan los valores de itrio presentes en los sectores 2, 3, 7, 8 y 13. Estos valores deben ser tomados con mesura ya que son afectados fuertemente por valores atípicos medidos en los análisis.
- Si bien en la mayoría de los casos estos elementos se asocian a altos niveles de hierro, la escala de estudio y el tipo de análisis geoquímico realizado no permiten establecer de manera fidedigna el o los mecanismos por los cuales estos elementos son incluidos en la red cristalina de las menas principales.
- El origen de estos elementos estratégicos se relaciona a la circulación de fluidos provenientes del emplazamiento de cuerpos magmáticos ígneos correspondientes a los plutones Sierra Chicharra y Diorita La Brea ocurrido entre los 132-119

millones de años (Cretácico inferior). La circulación de estos fluidos es controlada por estructuras geológicas pertenecientes al Sistema de Fallas Atacama, el cual tiene su traza principal en la zona de estudio.

6.2 Recomendaciones

- Para la siguiente fase de estudios se recomienda que los datos geoquímicos obtenidos sean complementados con otras metodologías geoquímicas enfocadas a la detección de elementos a nivel traza por ejemplo espectrometría de absorción atómica (AAS) o espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (ICP-AES).
- También se recomienda la aplicación de estudios químico-mineralógicos de alta resolución, por ejemplo SEM-EDS o QEMSCAN, para revelar el control mineralógico de los elementos estratégicos.
- En cuanto a metodologías geofísicas, dado que las menas principales son óxidos de hierro, se recomienda un estudio de magnetometría en los sectores de extracción de muestras para una interpretación en 3D de los cuerpos mineralizados.
- En el sector 1 ubicado en el sector mina “Bellavista” se encuentran valores excepcionalmente altos de vanadio asociados a la mena de hierro principal, por lo cual se sugiere un estudio a mayor profundidad para determinar la relación de estos elementos en el sector.
- Los sectores correspondientes a la zona 3 ilustrados en la fig. N°5.1 dadas sus características vetiformes podrían ser continuaciones de la misma veta o ramificaciones de una veta principal, por lo cual, se sugiere que de ser explotados estos sean agrupados para aumentar así la variedad de elementos estratégicos y/o críticos en el producto extraído.
- En el sector 7 se da una cierta correlación en los valores altos de cobre con elementos como torio y uranio por lo que se sugiere extraer muestras que a nivel macroscópico contengan alto contenido en cobre para estudiar en mayor profundidad su relación con estos elementos.
- Los estudios relacionados a elementos estratégicos y/o críticos en el país son escasos, por lo cual debería realizarse un estudio a nivel país o regional que clasifique estos elementos mediante las metodologías presentadas en la fig. N°2.1

Referencias

- Acosta, J., Huanacuni, D., & Robles, M. (2016). Los metales estratégicos en el Perú. *Horizonte Minero* 109 p 54-56.
- Andersson, P. (2020). Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, categories, policies, and implications. *The Extractive Industries and Society*, 7(1), 127-137.
- Arévalo, C. (2005). Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No 91. 53 p., 1 mapa escala 1:100.000
- Barton, M., & Johnson, D. (1996). Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide–(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24(3), 259-262.
- Barton, M. (2014). Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (pp. 515-541). Elsevier Inc.
- Barra, F., Martin, R., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*. 81: 62-78.
- Bauer, D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., Telleen, P., & Wanner, B. (2010). Critical Materials Strategy. US Department of Energy
- Bauer, D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., McKittrick M., Telleen, P., & Wanner, B. (2011). Critical Materials Strategy. US Department of Energy.
- Cannon, W., Kimball, B., & Corathers, L., (2017). Manganese. In: Schulz, K., DeYoung, J., Seal, R., y Bradley, D., (eds). *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802*, p. L1– L28
- Castor, S., & Hedrick, J. (2006). Rare earth elements. *Industrial minerals and rocks*, 769-792.
- Carlin, J. (2013). Mineral resource of the month: bismuth. *The Science Behind the Headlines*: 58. P 59.
- Cembrano, J., Garrido, I., & Marquardt, M. (2009, November). Tectonic setting of IOCG deposits in the Central Andes: Strike-slip-dominated deformation. In *XII Congreso Geológico Chileno, Santiago*.
- Chakhmouradian, A. & Wall, F. (2012). Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements*, 8(5), 333-340.

- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En Moreno, T. & Gibbon, W. (Eds), *The Geology of Chile*, (pp. 21-114). Londres, Inglaterra: Editorial Committee.
- Chen, H., Cooke, D., & Baker, M. (2013). Mesozoic iron oxide copper-gold mineralization in the Central Andes and the Gondwana supercontinent breakup. *Economic Geology*, 108(1), 37-44.
- Cifuentes C. (2019). Chile, minería más allá del cobre. Recuperado de [https://www.cochilco.cl/Presentaciones/2019_08_22_Chile - minería más allá del cobre_CCG.pdf](https://www.cochilco.cl/Presentaciones/2019_08_22_Chile_-_minería_más_allá_del_cobre_CCG.pdf)
- Clark J. & Reddy B. (1989). Critical and strategic materials. Concise Encyclopedia of Mineral Resources, 88-94. Pergamon, Oxford
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) (2016). Situación actual del mercado de Tierras Raras y su potencial en Chile. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tierras%20Raras%20final.pdf>
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) (2016a). Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos claves para la exploración minera. Recuperado de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Franjas_metalog%C3%A9nicas_de_Los_Andes_Centrales-Post_Validaci%C3%B3n_Completo.pdf
- Corriveau, L., Montreuil, J., & Potter, E. (2016). Alteration Facies Linkages Among Iron Oxide Copper-Gold, Iron Oxide-Apatite, and Affiliated Deposits in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, 111(8), 2045–2072.
- Dallmeyer, D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G., & Treolar, P. (1996). Mesozoic Magmatic and Tectonic Events Within the Andean Plate Boundary Zone, 26°-27°30', North Chile: Constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar Mineral Ages. *Journal of Geology*, Vol. 104, p. 19-40.
- Delgado, G. (2010). Ecología política de la minería en América Latina. *Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM, México*.
- Díaz, A., Vivallo, W., Jorquera, R., & Pizarro, N. (2003). Depósitos de Fe, óxidos de Fe-Cu-Au y su relación con el magmatismo del Cretácico Inferior, III Región de Atacama, Chile. In *Congreso Geológico Chileno* (No. 10).
- Edwards R., & Atkinson K. (1986). Ore deposits geology and its influence on mineral exploration. Primera edición, editorial Springer Science & Business Media. 466p., Nueva York, Estados Unidos.
- Elgueta, R. (1991). Interpretación geológica del vanadio en Cerro Principal, distrito minero El Romeral, región de Coquimbo, Chile. In *Congreso geológico chileno*. 6 (pp. 796-800).

- EPA. (2012). Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues.
- Evans, A. (2009). *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction*. Tercera edición Blackwell Scientific Publications, Oxford, Inglaterra
- European Commission. (2020). Study on the EU's list of Critical Raw Materials.
- Fischer, R. (1975). Vanadium resources in titaniferous magnetite deposits: U.S. Geological Survey Professional Paper 926–B, 9 p.
- Fischer, R. (1975a), Geology and resources of base-metal vanadate deposits: U.S. Geological Survey Professional Paper 926 –A, 13 p.
- Frietsch, R., & Perdahl, J. (1995). Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews*, 9(6), 489-510.
- Gambogi, J. (2017). Rare Earths [advance release], in *Metals and minerals: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2017*, v. I, p 60.1-60.17.
- Godoy, E., Marquardt, C., & Blanco N. (2003). Carta Caldera, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No 76, 39 p., 1 mapa escala 1:100.000
- Groves, D., Bierlein, F., Meinert, L., & Hitzman, M. (2010). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.
- Hatch, G. (2012). Dynamics in the global market for rare earths. *Elements* 8: 341-346
- Hawkins, M. (2001). Why we need cobalt, *Applied Earth Science*, 110:2, p. 66-70
- Hayes, S., & McCullough, E. (2018). Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies. *Resources Policy*, 59, 192-199.
- Hein, J., & Petersen, S. (2013). The geology of cobalt-rich ferromanganese crusts. Secretariat of the Pacific Community (SPC).
- Hein, J., & Petersen, S. (2013a). The geology of manganese nodules. Secretariat of the Pacific Community (SPC).
- Henriquez, F. (1978). Posibilidades de subproductos en la minería del hierro en Chile. *Revista Geológica de Chile*. 6: 53-57
- Hitzman, M., Oreskes, N. & Einaudi, M. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. In: G. Gaál and K. Schulz (Eds), *Precambrian Metallogeny Related to Plate Tectonics*. *Precambrian Res.*, 58:241-287.

- Hitzman, M., Bookstrom, A., Slack, J., & Zientek, M., (2017). Cobalt—Styles of deposits and the search for primary deposits: U.S. Geological Survey Open-File Report 2017–1155, 47 p.
- Kelley, K., Scott, T., Polyak, E., & Kimball, B. (2017). Vanadium, In: Schulz, K., DeYoung, J., Seal, R., y Bradley, D. (eds). Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. U1– U36
- Kloprogge, J., Ponce, C., & Loomis, T. (2020). The Periodic Table: Nature's Building Blocks: An Introduction to the Naturally Occurring Elements, Their Origins and Their Uses. Primera edición, Editorial Elsevier, 897p., Oxford. Inglaterra.
- Liang, T., Li, K., & Wang, L., (2014). State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China: Environmental Monitoring and Assessment, v. 186, no. 3, p. 1499–1513.
- Long, K. (2011). The future of rare earth elements—Will these high-tech industry elements continue in short supply?: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1189, 41 p.
- Maksaev V., Townley B., Palacios C., & Camus F. (2007). Metallic ore deposits. In: Moreno, T., & Gibbons, W. (eds). *The geology of Chile*, 179-199.
- Mapas.Mop.cl (2016). Cartas Camineras- MOP. Recuperado de <https://www.mapas.mop.cl/>
- Marschik, R., & Fontboté, L. (2001). The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*, 96(8), 1799-1826.
- Maynard, J., (2010). The chemistry of manganese ores through time—A signal of increasing diversity of Earth-surface environments: *Economic Geology*, v. 105, p. 535–552.
- Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S., & Tittler, A. (1995). La Franja de Maricunga: Síntesis de la evolución del frente volcánico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 22, p. 273-313.
- Munizaga, R., & Lagos, M. (2015). Antecedentes geológicos del yacimiento de magnetita-apatito Los Colorados, provincia del Huasco, Tercera Región de Atacama, Chile. In Abstracts XIV *Congreso Geológico Chileno*, La Serena (pp. 102-105).
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J., French, D., & Walshe, J. (2014). The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews*, 61, 1-32.
- Oyarzún, J., Collao, R., & Ferraz, C. (1991). Distribución regional de Cd, Bi, Ni, Zn y Mo en menas cupríferas chilenas entre los 22° y 33° S. In *Congreso geológico chileno*. 6 (pp. 714-718).

- Pollard, P. (2006). An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide–copper–gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita*, 41(2), 179-187.
- Polyak, D. (2012). Vanadium, in *Metals and minerals: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2011*, v. I, p. 80.1–80.9.
- Polyak, D. (2017). Vanadium [advance release], in *Metals and minerals: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2017*, v. I, p 81.1-81.11.
- Reedman, J. (1979). Geochemical Prospecting. In: J. Reedman (ed.) *Technique in Mineral Exploration*, primera edición, pp. 515-517.
- Regueiro, M. (2014). *Minerales críticos en Europa: metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales*. Macla, (19).
- Reynolds, I. (1985). The nature and origin of titaniferous magnetite-rich layers in the upper zone of the Bushveld Complex—A review and synthesis: *Economic Geology*, v. 80, p. 1089–1108.
- Ridley, J. (2013). *Ore deposit geology*. Primera edición, editorial Cambridge University Press, 392p., Inglaterra.
- Rodríguez, A., Villaseñor, G., Canet, C., Prol, M., & Camprubí, A. (2005). Clasificación de los yacimientos de manganeso y ejemplos de depósitos mexicanos e internacionales. *Boletín de mineralogía*, 16(1), 33-43.
- Rudnick, R. & Gao, S. (2003) The Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K., Eds., *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3, The Crust, Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64.
- Scheuber, E., & Andriessen P. (1990). The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, p. 243-257.
- Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., & Merz, C. (2011). Study on rare earths and their recycling. Öko-Institut eV Darmstadt.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), (2020). *Anuario de la Minería de Chile 2019*. Servicio Nacional de Geología y Minería, 283 p. Santiago.
- Shawe, D. (2011). Uranium-vanadium deposits of the Slick Rock district, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 576–F, 67 p.
- Singerling, S. (2017). Bismuth [advance release], in *Metals and minerals: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2017*, v. I, p 12.1-12.6.
- Sillitoe, R. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787-812.
- Skirrow, R. G. (2021). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits—a review (part 1): settings, mineralogy, ore geochemistry, and classification. *Ore Geology Reviews*.

- Smith, C. (2001). Always the brides maid, never the bride: cobalt geology and resources, *Applied Earth Science*, 110:2, 75-80.
- Taylor, S., & McLennan, S., (1995). The geochemical evolution of the continental crust: *Reviews of Geophysics*, v. 33, no. 2, p. 241–265.
- Thompson, J., Sillitoe, R., Baker, T., Lang J., & Mortensen, J. (1999). Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34 (4), 323-334.
- Tolcin, A. (2017). Manganese [advance release], in *Metals and minerals: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2017*, v. I, p 47.1-47.12
- Townley, B., Díaz, A., & Lucay, R. (2017). Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile.
- USGS (2019). *Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey*, 200 p.
- USGS (2021). *Mineral commodity summaries 2021: U.S. Geological Survey*, 200 p.
- Uyeda, S., & Kanamori, H. (1979). Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, p. 1049-1061
- Van Gosen, B., Verplanck, P., Seal, R., Long, K., & Gambogi, J. (2017). Rare-earth elements, In: Schulz, K., DeYoung, J., Seal, R., y Bradley, D. (eds). *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802*, p. O1– O31,
- Vivallo, W., Espinoza, S., & Henriquez, F. (1995). Metasomatismo y alteración hidrotermal en el distrito ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. *Andean Geology*, 22(1), 75-88
- Vivallo, W. (2009). Yacimientos de óxidos de Hierro-cobre-oro en Chile. In *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago.
- Vivallo, W., Díaz, A., & Jorquera, R. (2009). Provincias Metalogénicas en la Región de Atacama, Chile. In *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago.
- Warr, L. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291-320.
- Williams, P., Barton, M., Johnson, D., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N., & Marschik, R. (2005). Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin.
- Yañez, E., Sanhueza, C., López, G., González M., Moreno E., Flores F., Molina, A., Godoy, O., País, G., Aránguiz, J., Álvarez, R., & Strobl, R. (2021). *Chilepolimetálico: Diversificando la minería chilena, primera edición*, 43 p., Santiago, Chile.

Zappettini, E. (2021). Minerales y metales críticos y estratégicos-Análisis de situación y metodología de clasificación para la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas. Recursos Minerales N° 45, 19 pp.

Anexo: Datos geoquímicos

N° identificación	Norte	Este	Punto	Código muestr	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	S	Cl	K2O	CaO	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As
1479	6984667	361685	Punto 1	MIX1	3.637	4.020	8.196	0.462	0.000	0.051	0.204	45.085	0.268	0.082	0.021	0.152	36.219	0.121	0.000	0.018	0.002	0.000
1484	6984667	361685	Punto 1	MIX3	3.395	3.628	13.741	0.006	0.000	0.000	0.064	2.224	0.380	0.112	0.000	0.098	36.937	0.031	0.067	0.023	0.005	0.000
1485	6984667	361685	Punto 1	M2X1	4.754	2.421	9.943	0.024	0.000	0.001	0.074	0.704	0.286	0.262	0.000	0.119	41.791	0.127	0.073	0.014	0.004	0.000
1486	6976358	356942	Punto 2	M2X1	13.562	1.283	34.048	0.092	0.952	0.227	0.010	11.421	0.061	0.035	0.000	0.070	15.355	0.018	0.029	0.010	0.003	0.000
1487	6976358	356942	Punto 2	M2X2	4.523	2.425	9.636	0.005	0.008	0.000	0.078	1.588	0.089	0.267	0.000	0.141	47.725	0.396	0.073	0.019	0.005	0.000
1488	6976358	356942	Punto 2	M10X1 (I)	2.971	2.501	7.803	0.000	0.059	0.332	0.000	8.335	0.000	0.000	0.000	0.130	35.066	0.048	0.015	4.261	0.000	0.002
1489	6976358	356942	Punto 2	M10X1(II)	2.570	1.735	7.991	0.252	0.117	2.982	0.131	0.837	0.000	0.017	0.000	0.046	29.021	0.672	0.131	47.976	0.000	0.064
1490	6976358	356942	Punto 2	M3	0.000	3.050	34.513	0.093	0.230	0.212	0.263	0.740	0.000	0.000	0.000	0.874	21.485	0.000	0.012	0.058	0.003	0.000
1491	6976358	356942	Punto 2	M10X2	2.753	1.760	6.218	0.045	0.176	0.262	0.000	15.742	0.000	0.000	0.000	0.650	37.049	0.104	0.018	0.085	0.003	0.009
1492	6976358	356942	Punto 2	M4(A)	2.652	4.829	38.943	0.103	0.126	0.093	0.270	0.767	0.014	0.005	0.000	0.323	17.680	0.000	0.023	1.844	0.004	0.043
1493	6976358	356942	Punto 2	M4(B)	4.912	3.698	28.351	0.041	0.103	0.144	0.231	0.734	0.000	0.008	0.000	0.353	29.797	0.190	0.019	6.319	0.000	0.122
1494	6976358	356942	Punto 2	M5(A)	1.776	5.029	35.087	0.933	0.021	0.039	0.052	16.311	0.373	0.013	0.000	0.518	5.702	0.000	0.006	0.033	0.117	0.005
1495	6976358	356942	Punto 2	M5(B)	1.873	6.719	31.999	0.218	0.140	0.068	0.000	19.192	0.339	0.016	0.000	0.355	5.441	0.000	0.003	0.029	0.057	0.002
1496	6976358	356942	Punto 2	M5©	1.169	6.471	24.493	0.205	0.074	0.068	0.000	20.874	0.263	0.000	0.000	0.301	5.099	0.000	0.003	0.019	0.053	0.003
1497	6976358	356942	Punto 2	M6	13.923	17.335	32.387	0.000	0.340	0.218	0.144	0.775	0.574	0.007	0.000	0.468	21.195	0.085	0.010	0.026	0.010	0.006
1498	6976358	356942	Punto 2	M7	8.444	0.129	21.200	0.107	0.115	0.388	0.000	10.563	0.003	0.000	0.000	0.129	2.164	0.000	0.003	0.007	0.002	0.002
1499	6976358	356942	Punto 2	M8	2.761	1.262	34.530	0.351	0.067	0.144	0.004	8.425	0.025	0.016	0.000	0.113	3.841	0.000	0.002	0.009	0.001	0.004
1500	6976358	356942	Punto 2	M9	0.793	4.265	45.710	3.548	0.427	0.249	0.105	3.636	0.000	0.036	0.000	0.017	3.803	0.000	0.000	0.011	0.001	0.014
1501	6974352	355807	Punto 3	M11(A)	4.600	1.742	14.733	0.056	0.176	0.305	0.000	10.526	0.000	0.000	0.000	0.259	21.204	0.000	0.024	1.470	0.001	0.030
1502	6974352	355807	Punto 3	M11(B)	1.800	1.394	36.451	0.009	0.402	0.675	0.045	1.769	0.000	0.000	0.000	0.066	27.246	0.094	0.018	2.947	0.000	0.120
1503	6974352	355807	Punto 3	M13(A)	0.000	4.443	31.251	0.073	0.080	0.915	0.258	1.606	0.000	0.000	0.000	0.076	35.795	0.365	0.022	15.651	0.000	0.000
1504	6974352	355807	Punto 3	M13(B)	0.000	4.071	18.183	0.079	0.241	0.228	0.194	1.142	0.000	0.022	0.056	0.101	42.503	0.649	0.038	20.437	0.000	0.023
1505	6974352	355807	Punto 3	M14	2.392	2.937	7.753	0.224	0.097	0.024	0.139	1.040	0.000	0.028	0.000	0.652	21.947	0.000	0.070	3.789	0.001	0.006
1506	6974352	355807	Punto 3	M15	1.402	2.234	30.895	0.341	0.000	0.029	0.040	1.500	0.000	0.000	0.000	0.026	17.265	0.000	0.005	3.659	0.000	0.000
1507	6974352	355807	Punto 3	M16	1.871	2.750	15.431	0.037	0.000	0.652	0.108	3.601	0.000	0.000	0.000	0.153	20.288	0.000	0.019	15.882	0.000	0.000
1508	6974352	355807	Punto 3	M17	1.461	0.352	47.051	0.403	0.188	0.029	0.059	0.875	0.010	0.009	0.003	0.004	0.228	0.000	0.003	0.014	0.000	0.000
1509	6974352	355807	Punto 3	M18	2.753	1.578	10.474	0.651	0.189	0.074	0.000	49.506	0.025	0.000	0.006	0.286	3.039	0.000	0.000	0.113	0.001	0.001
1510	6974352	355807	Punto 3	M99	1.239	1.284	28.592	0.169	0.057	0.135	0.184	0.782	0.019	0.013	0.000	0.083	0.464	0.211	0.035	2.268	0.000	0.002
1972	6973191	356833	Punto 4	M100	1.601	4.864	15.556	0.162	0.152	0.050	0.164	0.977	0.000	0.005	0.000	0.116	45.373	0.446	0.033	0.574	0.005	0.000
1973	6973191	356833	Punto 4	M101	2.215	2.621	7.643	0.069	0.099	0.000	0.119	0.793	0.000	0.014	0.000	0.073	31.016	0.000	0.013	1.049	0.001	0.005
1511	6973191	356833	Punto 5	M9(A)	0.000	18.381	20.476	0.347	7.489	0.143	1.315	1.303	0.000	0.016	0.000	0.084	43.274	0.305	0.015	0.198	0.004	0.000
1512	6973191	356833	Punto 5	M9(B)	1.869	4.741	8.793	0.000	3.117	0.054	0.522	0.491	0.011	0.000	0.000	0.028	13.576	0.000	0.031	0.099	0.003	0.003
1952	6974169	355855	Punto 6	M1	1.570	7.163	42.490	0.161	0.436	0.155	0.180	1.285	0.260	0.008	0.000	0.067	7.617	0.000	0.004	0.014	0.003	0.001
1953	6974169	355855	Punto 6	M2	2.466	6.568	18.354	0.114	0.300	0.342	0.446	0.666	0.000	0.030	0.000	0.101	46.479	0.488	0.036	0.053	0.005	0.000
1954	6974169	355855	Punto 6	M4	0.000	4.026	55.353	0.267	0.150	0.123	0.255	0.254	0.027	0.010	0.000	0.358	25.279	0.098	0.020	0.174	0.020	0.005
1955	6974169	355855	Punto 6	M1	2.493	2.405	4.940	0.000	0.199	0.065	0.051	0.310	0.000	0.007	0.000	0.156	46.345	0.200	0.051	0.310	0.016	0.000
1956	6974169	355855	Punto 6	M3	0.000	4.888	14.935	0.064	0.186	0.413	0.271	0.886	0.000	0.002	0.000	0.343	34.968	0.269	0.068	0.908	0.050	0.000
1957	6974169	355855	Punto 6	M7(A)	1.300	1.329	27.597	0.023	0.166	1.098	0.079	1.237	0.000	0.024	0.000	5.016	9.292	0.314	0.050	12.285	0.031	0.006
1958	6974169	355855	Punto 6	M7(B)	0.000	2.708	20.740	0.104	0.266	0.169	0.100	12.993	0.000	0.031	0.000	1.567	21.998	0.000	0.017	2.479	0.029	0.009
1883	6973267	358549	Punto 7	M7©	3.048	1.098	10.867	0.000	0.030	0.683	0.189	0.393	0.018	0.006	0.000	0.079	4.459	0.000	0.061	15.058	0.039	0.005
1884	6973267	358549	Punto 7	M8	0.000	9.133	33.919	0.723	0.223	0.130	0.462	0.406	0.179	0.008	0.000	0.140	34.246	0.227	0.018	0.114	0.008	0.000
1885	6973267	358549	Punto 7	M3(A)	2.138	1.729	3.960	0.437	0.088	0.000	0.029	1.541	0.000	0.025	0.000	0.126	47.920	0.180	0.029	0.194	0.003	0.000
1886	6973267	358549	Punto 7	M3(B)	2.166	2.800	28.634	0.087	0.182	0.280	0.114	3.153	0.000	0.028	0.005	0.107	38.084	0.474	0.000	23.805	0.000	0.000
1887	6973267	358549	Punto 7	M3 © CHICAZA	3.226	1.593	14.375	0.133	0.000	0.558	0.062	0.665	0.004	0.033	0.000	0.050	22.833	0.369	0.053	67.128	0.000	0.000
1888	6973267	358549	Punto 7	M3 (D) chica	3.216	3.211	11.647	0.300	0.325	0.097	0.063	1.228	0.000	0.019	0.000	0.085	29.554	0.000	0.022	0.736	0.005	0.000
1889	6973267	358549	Punto 7	M1	1.820	2.635	7.534	0.014	0.000	0.071	0.007	1.705	0.000	0.018	0.000	0.100	37.955	0.000	0.043	0.463	0.005	0.000
1890	6973267	358549	Punto 7	M2(A)	0.000	1.519	11.552	0.034	0.000	9.163	0.016	0.754	0.013	0.018	0.006	0.012	2.838	0.023	0.177	56.279	0.000	0.001
1891	6973267	358549	Punto 7	M2(B)	0.000	1.046	52.833	0.118	0.019	0.197	0.042	0.714	0.000	0.013	0.000	0.011	10.263	0.000	0.001	3.024	0.000	0.000
1959	6973434	358329	Punto 8	M4(A)	0.000	0.878	28.602	0.001	0.026	0.314	0.065	0.434	0.021	0.017	0.005	0.248	0.890	0.039	0.141	49.937	0.013	0.000
1960	6973434	358329	Punto 8	M4(B)	2.238	0.617	20.936	0.000	0.007	1.233	0.049	0.566	0.014	0.014	0.002	0.082	1.004	0.000	0.086	32.579	0.000	0.000
1961	6973434	358329	Punto 8	M20(A)	1.547	1.387	8.170	0.041	0.149	0.042	0.040	0.365	0.000	0.255	0.000	0.077	29.247	0.000	0.048	0.087	0.003	0.000
1962	6973434	358329	Punto 8	M20(B)	4.998	5.453	33.316	0.083	1.275	0.569	0.272	1.546	0.123	0.097	0.000	0.10						

