



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

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA, LITOLÓGICA Y ESPACIAL DE
LAS TIERRAS RARAS EN EL YACIMIENTO EL TENIENTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

ANGÉLICA BELÉN LÓPEZ ARAYA

PROFESOR GUÍA:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LUDOVINA BURGOS RAMÍREZ

JUAN PABLO LACASSIE

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TITULO DE: Geóloga

POR: Angélica Belén López Araya

FECHA: 27/07/2017

PROFESOR GUIA: Brian Townley Callejas

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA, LITOLÓGICA Y ESPACIAL DE LAS TIERRAS RARAS EN EL YACIMIENTO EL TENIENTE.

El estudio del presente trabajo de título tiene por finalidad conocer la ocurrencia, distribución y concentraciones de tierras raras en el yacimiento El Teniente.

Las tierras raras son un grupo de 17 elementos químicos: escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de los lantánidos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio).

En este trabajo se presenta el resultado para los siguientes 14 elementos: lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio. Para este estudio se definieron 6 unidades monolitológicas, considerando el análisis químico de 405 muestras de sondaje, siendo las siguientes: Complejo de Brechas Braden, Complejo Máfico El Teniente, Brechas de Cuarzo y Anhidrita, Pórfido Dacítico, Pórfido Diorítico y Tonalita.

Las tierras raras se presentan en fosfatos, carbonatos, óxidos y silicatos. Dentro de las litologías del yacimiento las concentraciones de REE ocurren en apatito, biotita y plagioclasa a nivel traza. Las REE no presentan relación con sulfuros de cobre.

Se obtuvo como resultado que las seis principales litologías presentes en el yacimiento El Teniente presentan mayores concentraciones de tierras raras livianas con respecto a las tierras raras pesadas. Las tierras raras livianas están correlacionadas entre sí, así como las tierras raras pesadas. Dentro de las tierras raras livianas las concentraciones son similares en todas las litologías, mientras que existen dos grupos dentro de las tierras raras pesadas. Se propone la presencia de dos pulsos magmáticos distintos en diferentes períodos.

Las concentraciones de tierras raras dentro del yacimiento son menores que aquellas determinadas en la roca caja, la formación Farellones.

Existe un empobrecimiento de las REE en los concentrados, mientras que hay un enriquecimiento de estos elementos en los relaves.

El yacimiento presenta bajas concentraciones de estos elementos, con respecto a yacimientos donde se explotan las tierras raras, con un promedio inferior a la centena de ppm, por tanto, su explotación no es viable.

DEDICATORIA

A mis padres: Mauricio López y M^a Angélica Araya

Quienes me han enseñado a luchar en la vida

Y a mis hermanos: Salomón, Celeste, David, Jonathan y Jennifer

Por alegría que vivimos en casa

A Quentin

Por compartir su vida conmigo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a cada una de las personas que han estado conmigo durante esta larga estadía por la U y en el extranjero.

Gracias Isma Murillo por presentarme la geología, por acompañarme a la primera clase. Gracias Panchito Hervé por hacer que la geología y los terrenos sean mi pasión.

Gracias Diego Araya y Sergio Concha por todas esas mañanas estudiosas en el CEI, en la pajarera, en la biblioteca, en todos lados...logramos pasar todo plan común! Gracias a todos los cabros del Nacional por su ayuda en mate...

Gracias Juanpito, Villalón, Chiri, y al más Ariqueño, Huguito Ochoa por apañar en Geo los primeros años.

Gracias Pilar Valderrama por los 6 años de difusión, tú confiaste en mí desde el primer día, te agradezco todos tus consejos y tu tiempo conmigo.

Gracias a Codelco por la beca que me permitió ir a Francia, mi vida cambió completamente con el intercambio.

Gracias Lauris, Lemuel, Jorge, Camilo y Víctor (la mejor cordada).

Gracias a todo el personal de Geo: Kilito, Roberto y William. En especial gracias Blanquis por toda tu paciencia, eres la mejor!

A mis amigas del Liceo, Panchi (y Seba), Dani, Domi, Naty por esos buenos carretes de toda la vida.

Gracias a todos los chiquillos y chiquillas de Teniente, Luchito, Jorgito, Jorge, Marce, Caro, Marcelo, Maribel, Alejandra, Felipe y en especial a Ludovina Burgos por la paciencia y el tiempo que ha tenido conmigo.

Gracias JP Lacassie por tu ayuda con la memoria, y tus referencias para llegar a la isla soñada.

Gracias Profe Brian por su tiempo, consejos y comprensión que ha tenido durante la memoria.

Gracias a todos los que he olvidado en estas líneas, por compartir los buenos momentos, pero en especial los malos.

Gracias a todos los que han compartido un ratito de su tiempo, porque han hecho que estos años hayan sido una experiencia increíble.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.3	APLICABILIDAD Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	3
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	4
1.4.1	<i>Etapa Bibliográfica</i>	4
1.4.2	<i>Etapa de Recolección de Datos</i>	4
1.4.3	<i>Etapa de Análisis de datos (Gabinete)</i>	4
1.4.4	<i>Redes neuronales artificiales</i>	5
1.4.5	<i>Diagrama de multielementos</i>	7
1.4.6	<i>Ubicación y Accesos</i>	7
1.4.7	<i>Fisiografía</i>	8
1.4.8	<i>Clima, Flora y Fauna</i>	9
2	MARCO GEOLÓGICO.....	10
2.1	GEOLOGÍA REGIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	10
2.1.1	<i>Rocas Estratificadas</i>	10
2.1.2	<i>Rocas Intrusivas</i>	13
2.1.3	<i>Estructuras</i>	14
2.2	GEOLOGÍA DISTRITAL	15
2.2.1	<i>Secuencias estratificadas</i>	15
2.2.2	<i>Rocas Intrusivas</i>	18
2.2.3	<i>Estructuras</i>	18
2.3	GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO EL TENIENTE	19
2.3.1	<i>Litología</i>	20
2.3.2	<i>Geología estructural del Yacimiento</i>	24
2.3.3	<i>Alteración y mineralización</i>	25
3	TIERRAS RARAS	30
3.1	QUÍMICA	30
3.2	ABUNDANCIA.....	31
3.3	MINERALES PORTADORES DE REE.....	32
3.4	PROCESAMIENTO	36
3.5	APLICACIONES	36
3.6	PRODUCCIÓN Y MERCADO	36
3.7	EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN EN EL MUNDO	38
4	DEFINICIÓN DEL SISTEMA	42
4.1	SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS	42
5	RESULTADOS.....	45
5.1	ANÁLISIS DE DATOS	45
5.2	ANÁLISIS UNIVARIABLE	51
5.2.1	<i>Histogramas</i>	51

5.2.2	<i>Boxplots</i>	54
5.3	ANÁLISIS MULTIVARIABLE.....	57
5.3.1	<i>Matriz de correlación</i>	57
5.3.2	<i>Redes Neuronales Artificiales</i>	66
5.4	DIAGRAMA DE CONDRIOS.....	73
5.5	CORRELACIÓN DE MINERALOGÍA CON ANÁLISIS QUÍMICOS.....	74
5.5.1	<i>QEMSCAN</i>	74
5.5.2	<i>ICP</i>	80
5.6	ALTERACIÓN.....	84
5.6.1	<i>Análisis de unidades litológicas aledañas</i>	86
5.7	PROFUNDIDAD VERSUS CONCENTRACIÓN.....	88
5.8	CONCENTRADOS Y RELAVES.....	93
5.8.1	<i>Concentrados</i>	93
5.8.2	<i>Relaves</i>	95
6	DISCUSIÓN	96
7	CONCLUSIONES	100
8	RECOMENDACIONES	102
	BIBLIOGRAFIA	103
	ANEXOS	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos al área de estudio del Yacimiento El Teniente (Rectángulo rojo) (Hitschfeld, 2006).	1
Figura 1.2. Proceso de crecimiento de una red GCS.	6
Figura 2.1. Mapa Geológico Regional de la zona de estudio (modificado de Charrier et al., 1996). El área de estudio se encuentra señalada en el mapa con un punto blanco.	11
Figura 2.2. Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrencia sinistral de rumbo N50°W, que coincide con la zona de falla Río Blanco-Codegua. Modificado de Falcón y Rivera (1998).	14
Figura 2.3. Mapa geológico Distrito Teniente. Modificado de Floody y Huete (1998).	17
Figura 2.4. Mapa Geológico con las principales unidades litológicas del Yacimiento El Teniente, nivel 2165 m.s.n.m. (Modificado de plano GL1-10117-0, División El Teniente-Codelco-Chile).	21
Figura 3.1. Elementos que conforman las tierras raras dentro de la tabla periódica (Fuente: www.tre-ag.com).	30
Figura 3.2. Abundancia de elementos en la corteza terrestre (U.S. Geological Survey, 2005).	31
Figura 3.3. Producción total de óxidos de tierras raras (U.S. Geological Survey, 2011).	37
Figura 3.4. Distribución de la exploración y explotación de proyectos de REE en el mundo (Watanabe, 2014).	39
Figura 4.1. Cantidad de datos por litología con REE.	43
Figura 5.1. Isométrico con distribución espacial de la totalidad de los datos geoquímicos. La masa celeste corresponde a la Brecha Braden; Las líneas grises son los sondajes realizados que presentan datos químicos de REE; color azul, celeste, verde, amarillo, naranja, rojo y café representan el contenido de REE en la escala 0-100%, siendo el azul el valor más bajo y el rojo el más alto.	45
Figura 5.2. Concentración de REE en proyectos de exploración y explotación de REE, pórfidos cupríferos, corteza oceánica y corteza continental.	50
Figura 5.3. Histogramas de lantano y cerio según litologías. Los colores de la leyenda corresponden a los tonos utilizados en la mina para cada litología (Continuación en pág. 53-54).	51
Figura 5.4. Histogramas de praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio y terbio, según litologías. Los colores de la leyenda corresponden a los tonos utilizados en la mina para cada litología (Continuación en pág. 54).	52
Figura 5.5. Histogramas de disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio, según litologías. Los colores de la leyenda corresponden a los tonos utilizados en la mina para cada litología.	53

Figura 5.6. Boxplots con eje logarítmico base 10 de lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario y europio, por litología. Línea continua roja corresponde al límite de detección (Continuación Pág 56).	54
Figura 5.7. Boxplots con eje logarítmico base 10 de gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio, por litología. Línea continua roja corresponde al límite de detección.	55
Figura 5.8. Scatter plot de La versus tierras raras.	63
Figura 5.9. Scatter plot de Eu versus tierras raras.	64
Figura 5.10. Scatter plot de Lu versus tierras raras.	65
Figura 5.11. Red del tipo GCS compuesta por 6 nodos correspondiente al arreglo total de datos. Cada número representa un cluster de muestras con comportamiento químico similar. Los círculos rojos comprenden las litologías representativas de los nodos.....	66
Figura 5.12. Red neuronal artificial de lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario y europio.....	67
Figura 5.13. Red neuronal artificial de gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio.	68
Figura 5.14. Distribución espacial de cada nodo de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta. Las líneas grises son los sondajes realizados que presentan datos químicos de REE; color azul, celeste, verde, amarillo, naranja, rojo y café representan el contenido de REE en la escala 0-100%, siendo el azul el valor más bajo y el rojo el más alto.	71
Figura 5.15. Distribución espacial de cada nodo de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta. Las líneas grises son los sondajes realizados que presentan datos químicos de REE; color azul, celeste, verde, amarillo, naranja, rojo y café representan el contenido de REE en la escala 0-100%, siendo el azul el valor más bajo y el rojo el más alto.	72
Figura 5.16. Tierras raras normalizadas a la abundancia condritica con valores de Sun y Mcdonough (La: 0.24; Ce: 0.61; Pr: 0.09; Nd: 0.46; Pm: 0.26; Sm: 0.15; Eu: 0.06; Gd: 0.2; Tb: 0.04; Dy: 0.25; Ho: 0.05; Er: 0.16; Tm: 0.02; Yb: 0.16; Lu: 0.02).	73
Figura 5.17. Gráfico de sedimentación.....	77
Figura 5.18. Círculo de correlación, ejes F1 y F2.	78
Figura 5.19. Círculo de correlación, ejes F1 y F3.	79
Figura 5.20. Círculo de correlación, ejes F1 y F4.	79
Figura 5.21. Círculo de correlación, ejes F2 y F3.	80
Figura 5.22. Concentraciones de REE en la Formación Farellones (FF) (color azul) y las litologías del yacimiento El Teniente. Teniente (CMET) (color verde).	87
Figura 5.23. Concentraciones de REE en la las rocas máficas de la Formación Farellones (FF) (color rojo) y del Complejo Máfico El Teniente (CMET) (color gris).	87
Figura 5.24. Concentración de lantano en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.	89

Figura 5.25. Concentración de cerio en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.	90
Figura 5.26. Concentración de yterbio en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.	91
Figura 5.27. Concentración de lutecio en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.	92
Figura 5.28. Concentraciones del promedio del concentrado tras el proceso de flotación (en azul) junto al promedio de REE de las unidades de estudio del yacimiento El Teniente. El eje Y está en escala logarítmica de base 10.	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de vetillas en el yacimiento El Teniente. Los números representan: 1=Microvetillas; 2= Vetillas; 3=Vetas (Estándares y Metodologías para geología de Minas, 2003).....	28
Tabla 3.1. Minerales que presentan tierras raras con un alto potencial económico. Los nombres están escritos en inglés, dado que no todos cuentan con la traducción al español.....	33
Tabla 3.2. Porcentaje máximo de elementos de REE en óxidos de tierras raras (REEO) de monacita, bastnasita, xenotimo y apatito (Neary, C.R., Highley, D.E., 1984). 35	
Tabla 3.3. Proyectos de exploración y explotación de tierras raras (Continuación pág. 43). Fuente: www.techmetalsresearch.com	40
Tabla 3.4. Proyectos de exploración y explotación de tierras raras.Fuente: www.techmetalsresearch.com	41
Tabla 4.1. Total de muestras de sondajes con análisis químicos en las 14 tierras raras en estudio para cada litología.....	43
Tabla 5.1. Análisis estadísticos de CMET, BXANH_BXQZ y CBB. Se presenta la media, la desviación estándar, el mínimo y máximo. Concentraciones en ppm.	47
Tabla 5.2. Análisis estadísticos de PDI, PDA y TO. Se presenta la media, la desviación estándar, el mínimo y máximo. Concentraciones en ppm.	48
Tabla 5.3. Matriz de correlación del promedio de las concentraciones de Tierras raras. Se ha encerrado en rectángulos rojos las tierras raras livianas y pesadas. Los colores representan la correlación entre las tierras raras que varían entre verde, amarillo, naranja y rojo entre la escala [0,1]. La correlación es directa o positiva si el coeficiente de correlación es positivo, e inversa o negativa si el coeficiente es negativo.....	58
Tabla 5.4. Matriz de correlación de tierras raras en el Complejo Máfico El teniente.....	58
Tabla 5.5. Matriz de correlación de tierras raras de Brechas de anhidrita y cuarzo.....	59
Tabla 5.6. Matriz de correlación de tierras raras de Complejo de Brechas Braden.	59
Tabla 5.7. Matriz de correlación de tierras raras del Pórfido diorítico.....	60
Tabla 5.8. Matriz de correlación de tierras raras del Pórfido dacítico.	60
Tabla 5.9. Matriz de correlación de tierras raras de Tonalita.	61
Tabla 5.10. Litologías correspondientes a cada Nodo.....	69
Tabla 5.11 Matriz de correlación de tierras raras con análisis QEMSCAN.....	75
Tabla 5.12. Matriz de correlación de tierras raras con análisis ICP.	81
Tabla 5.13. Matriz de correlación de tierras raras con análisis ICP.	82
Tabla 5.14. Formación Farellones, Kay and Kurtz (1995).....	86
Tabla 5.15. Concentración de tierras raras en los concentrados de 3 muestras (en ppm).	94
Tabla 5.16. REE del Tranque Cauquenes. Fuente: Antonucci, 2014.	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Lista cronológica del descubrimiento de las distintas tierras raras junto a su radio iónico estimado (Alguacil, 1997).	110
Anexo B. Características físico-químicas de los elementos de tierras raras (Fuente: Flahaut J., 1969. Les Éléments des terres rares. Paris, Masson et Cie).	111
Anexo C. Tamaño, grado-% de óxidos de tierras raras (REEO) y tipo de depósito, con producción o potencial.	112
Anexo D. Toneladas métricas de óxido de tierras raras por año de producción en los países productores.	113
Anexo E. Límite de detección a través de ICP. Laboratorios Actlabs, Canadá.	114
Anexo F. Tabla de Estadígrafos del promedio de las litologías en estudio para cada elemento de tierras raras, en ppm.	115

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de tierras raras se realiza en forma puntual en algunos de los yacimientos mineros, existiendo pocos antecedentes acerca de la presencia y potencial minero de estos elementos.

Existen pocos antecedentes acerca de la presencia y perspectivas de recursos de tierras raras. Actualmente en Chile, no existen yacimientos en explotación de tierras raras, pero dada la demanda mundial por estos elementos, se ha comenzado su investigación, principalmente por la empresa Biolantánidos. El valor por kilogramo de estos elementos varía desde una decena de dólares a miles de dólares, siendo China el país que domina el mercado (López, 2016).

Este es el primer estudio global que analiza la química y distribución de elementos de tierras raras dentro del yacimiento El Teniente.

1.1 Antecedentes Generales

Este trabajo se llevó a cabo en la División El Teniente, una de las siete divisiones de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO-Chile). El Teniente es el yacimiento de Cobre-Molibdeno subterráneo más grande del planeta (Skewes *et al.*, 2002), ubicado en la Cordillera de los Andes de Chile Central, a 2.500 metros sobre el nivel del mar (Figura 1.1).

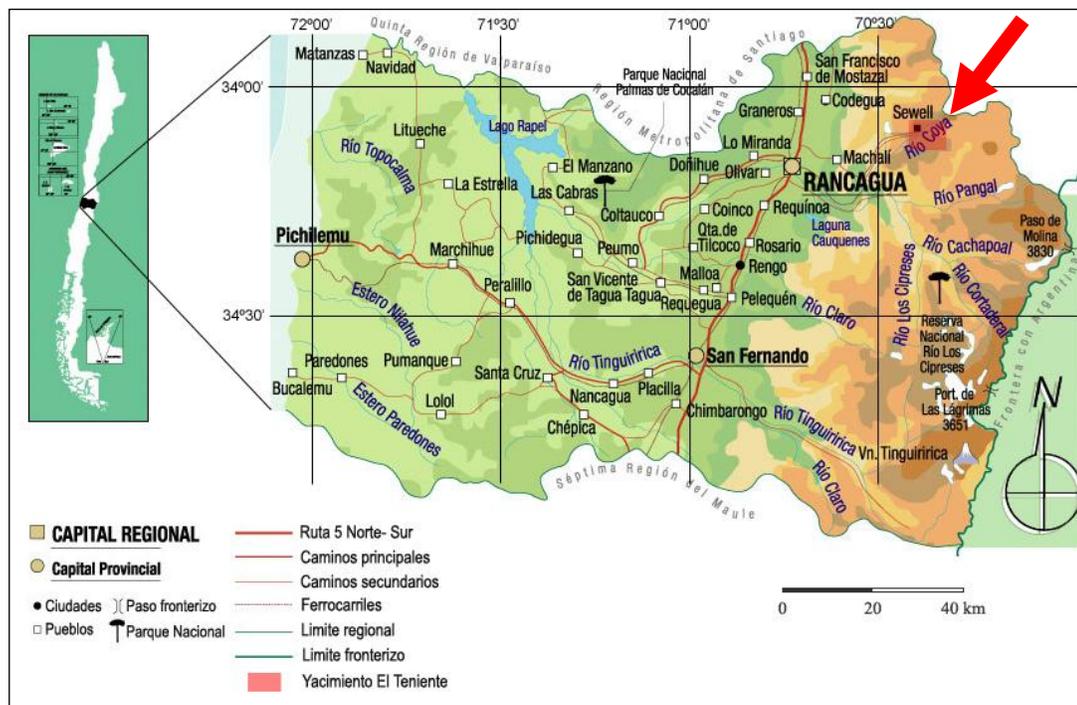


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos al área de estudio del Yacimiento El Teniente (Rectángulo rojo) (Hitschfeld, 2006).

El Teniente, es un yacimiento formado dentro de la evolución del arco magmático del Mioceno-Plioceno temprano que se sitúa en el extremo norte de la Zona Volcánica Sur Andina (ZVS), emplazado a 260 km al este de la fosa oceánica actual y a 90 Km sobre la zona sísmica, donde la placa de Nazca subducta bajo la corteza continental de la placa Sudamericana en un ángulo de 30° hacia el este (Barazangi e Isacks, 1976). Su origen es magmático-hidrotermal y puede ser clasificado de acuerdo a su tamaño como “súper gigante” (Maksaev, 2004).

El distrito geológico es dominado por rocas volcánicas correspondientes a la Formación Farellones, localmente intruida por rocas ígneas de composición intermedia, además de brechas hidrotermales (Kay *et al.*, 1991). Las rocas presentan distintos grados de alteración, con mineralización metálica, principalmente de calcopirita, bornita y molibdenita, la que se encuentra en vetillas que forman un enrejado polidireccional o stockwork (referencia interna SGL-I-123/03. 2003).

La explotación del Yacimiento comenzó en el año 1905 y se ha desarrollado en forma subterránea mediante el uso de dos métodos: “*Block Caving*” o “Hundimiento Gravitacional de Bloques, empleado hasta el año 2000. Actualmente, el método de extracción es “*Panel Caving*” o “Hundimiento de Paneles y Derrumbe” debido a explotación a mayor profundidad y la mayor dureza de la roca (Valenzuela, 2003).

Con una producción en torno a las 137 mil toneladas diarias de mineral, El Teniente posee un complejo integrado por mina, planta y fundición y un mineral con ley de cobre promedio de 0,97% CuT (concentración del metal con valor comercial por tonelada). El yacimiento está conformado por un cuerpo geológico que tiene la forma de un cono o pipa de mineral, el cual no posee valor económico. Sin embargo, alrededor de éste hay importante mineral, estimado en más de 18.000 MT (millones de toneladas) con ley de 0,57% CuT de recursos geológicos, lo que garantiza la explotación del sector por más de 100 años a los actuales niveles de extracción (Codelco, 2011).

La División posee reservas y recursos minerales por más de 4.000 MT de mineral con ley de cobre igual a 0,84% CuT, (2011). Esto equivale a más de 35 MT de cobre fino de producción estipulado hasta el año 2087. Este gigantesco depósito cuprífero, hace de El Teniente uno de los yacimientos de cobre con mayor proyección y vida a nivel mundial. En los últimos años, El Teniente ha alcanzado una producción de 404 mil toneladas anuales de cobre fino, aportando el 25% de la producción total de CODELCO. Sus principales productos son cobre refinado a fuego (RAF), ánodos y cátodos de cobre. El Teniente también extrae subproductos como molibdeno y ácido sulfúrico (Codelco, 2011).

El cuerpo mineralizado de cobre ocupa por lo menos 2,7 x 2 km², con una profundidad total de mineralización de cobre desconocida, ya que los sondajes más profundos de El Teniente intersectan zonas de altas leyes de cobre, lo que evidencia que el yacimiento está abierto en profundidad (Skewes *et al.*, 2002). Las instalaciones de la mina ocupan un área mayor a los 3 km², extendiéndose por más de 1 km en la vertical.

El Teniente ha sido denominado como un depósito de tipo “Pórfido Cuprífero” por los diferentes autores (Maksaev et al, 2001; Cannell, 2004), aunque también se ha postulado como un “Depósito de Brechas” (Skewes *et al.*, 2002).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es determinar las concentraciones de los elementos de tierras raras (REE) y la ocurrencia mineral de estos en el yacimiento El Teniente.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar y cuantificar las tierras raras presentes en el yacimiento junto a su ocurrencia mineral y relación con las principales asociaciones minerales de litología y /o alteración hidrotermal.

Entregar la distribución espacial, como su comportamiento de concentraciones con respecto a la profundidad.

Establecer zonas con anomalías geoquímicas dentro de los distintos niveles y las distintas unidades litológicas en los diversos sectores del yacimiento de estos elementos.

Determinar la relación entre tierras raras en función de su ocurrencia mineral y litológica y/o altitud.

Comparar las concentraciones de tierras raras de las litologías del yacimiento con respecto a las de la roca caja.

1.3 Aplicabilidad y limitaciones del estudio

Si las concentraciones de las tierras raras en el yacimiento El Teniente son atractivas en el mercado actual, se deberá definir el área de la futura explotación, ocurrencia mineral, factibilidad de recuperación y concentración, etc...

Dado que éste trabajo se realizó con las bases de datos reales correspondiente a sondajes de exploración del yacimiento, el estudio se limita a la precisión de los datos geoquímicos obtenidos por el área de Geometalurgia.

Todas las medidas experimentales vienen afectadas de una cierta imprecisión inevitable debida a las imperfecciones del aparato de medida. Dado que se trabajó con datos geoquímicos, es ideal compararlos con los errores asociados a cada análisis, ya que este puede ser muy alto.

La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er y Yb presentan límites de detección de 0,1 ppm; Eu con 0,05ppm; Tm y Lu de 0,04ppm.

1.4 Metodología de Trabajo

El trabajo se realizó en la Superintendencia de Geología, perteneciente a la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, en las dependencias de Colón Alto, Provincia del Cachapoal, VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile.

Este estudio considera su desarrollo en tres etapas principales: revisión bibliográfica, recolección de datos y análisis de datos.

1.4.1 Etapa Bibliográfica

En esta etapa se recopila, selecciona y se analiza toda la información correspondiente a la geología del yacimiento y estudios relacionados al tema de interés: elementos trazas y REE. En base a esta información se define la metodología de trabajo y se realiza el marco geológico, lo que permite tener una visión general del yacimiento. De esta forma se busca la manera más óptima de resolver la problemática.

1.4.2 Etapa de Recolección de Datos

Se realiza la recopilación de datos de geoquímica de REE y elementos trazas de diferentes partes del yacimiento, correspondientes a memorias y publicaciones de diferentes autores a partir del año 1974 a la fecha. La base de datos geoquímicos consta de un total de 1105 muestras con información de concentración para 56 elementos químicos, de estos 10 mayores: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, y 46 elementos trazas.

Los datos geoquímicos utilizados en este trabajo corresponden a las muestras realizadas por la unidad de Geometalurgia en la última década.

1.4.3 Etapa de Análisis de datos (Gabinete)

A partir del estudio geoquímico realizado principalmente por el área de Geometalurgia del Teniente, se elabora una base de datos de todo el material disponible, verificando su litología a través de *XILAB_MAP* e imágenes reales de sondajes. Se realiza un análisis detallado de la distribución de concentraciones de REE para finalizar con la visualización gráfica y análisis estadísticos.

Se definieron 6 grupos litológicos. Se han eliminado las mezclas de litologías, seleccionándose únicamente las monolitológicas. Se descartaron las muestras de rocas de brechas ígneas ya que sus clastos pueden provenir de distintas litologías. Finalmente se escogieron los datos de muestras que tengan información geoquímica de las 14 tierras raras, siendo descartados los elementos itrio y escandio en este estudio, dado el bajo número de análisis de estos elementos en las muestras de sondaje.

Para definir la correlación entre las REE, se han realizado análisis estadísticos univariados, histogramas, boxplots y scatter plots.

Se realiza el análisis con redes neuronales artificiales (RNA) a través del software MATLAB. Esta operación indica la relación lineal y no lineal entre distintas unidades litológicas y sus elementos a fin de identificar un reducido número de clusters que indiquen comportamientos geoquímicos similares.

Se expone el diagrama de estos elementos normalizadas en base a condritos para conocer si existen anomalías geoquímicas.

Se comparan los resultados de las unidades del yacimiento junto a la formación aledaña.

Se identifican y cuantifican las tierras raras presentes en el yacimiento junto a sus asociaciones mineralógicas.

Se contrastan las concentraciones de los concentrados y relaves.

Finalmente, se determina la relación entre profundidad según cada litología de sus concentraciones.

1.4.4 Redes neuronales artificiales

Las Redes neuronales artificiales (RNA) son modelos artificiales de redes neuronales biológicas, constituidas por unidades procesadoras individuales o “neuronas” interconectadas de forma tal que el sistema es capaz de realizar operaciones sofisticadas (“inteligentes”), similares a las que el cerebro realiza rutinariamente.

Dado el gran volumen de información disponible para este estudio, se han utilizado redes neuronales artificiales (RNA), específicamente las del tipo *Growing Cell Structures* (GCS; Fritzke, 1994). Las GCS presentan una gran ventaja en comparación a otros tipos de análisis estadísticos multivariados (ejemplo: PCA), debido a que el algoritmo considera tanto relaciones lineales como no lineales entre las variables (Lacassie, 2003), y por tanto los resultados obtenidos poseen una mayor significancia estadística.

Las RNA se han utilizado satisfactoriamente en el área de la geoquímica, las cuales presentan importantes ventajas comparativas para realizar análisis multidimensionales, ya que permiten analizar, visual y cuantitativamente, las diferencias geoquímicas entre los distintos grupos de proveniencia.

Las del tipo GCS son redes auto-organizativas generadas gradualmente durante el proceso incremental de autoaprendizaje y son determinadas por el problema en cuestión. Esta red puede ser descrita como una matriz de salida bidimensional, donde las unidades están organizadas formando triángulos, luego la estructura se va reorganizando en cada iteración donde puede o no insertarse una nueva unidad, la que se conecta localmente a las otras unidades vecinas, emergiendo nuevamente la estructura triangular. Después del aprendizaje, la estructura de la red GCS corresponde a un número determinado de unidades o nodos, los cuales se encuentran conectados con sus vecinos a través de vértices en forma de triángulos (Figura 1.2). Mediante

iteraciones se produce el proceso de aprendizaje y la reorganización de la red, en la que se determina donde insertar nuevas unidades en la misma. En términos prácticos, las GCS permiten proyectar grandes conjuntos de datos multidimensionales en representaciones bi-dimensionales o mapas de características donde la información más relevante para la tarea de agrupar, se puede rescatar a partir de inspección visual (Lacassie, 2004).

La Figura 1.2 señala una estructura inicial (izquierda) con unidades correspondientes a los vértices del triángulo. Luego de un número λ constante de iteraciones la estructura se reorganiza con o sin inserción de una nueva unidad (círculo negro), la que se conecta localmente a las unidades presentes en su vecindad (Lacassie, 2003).

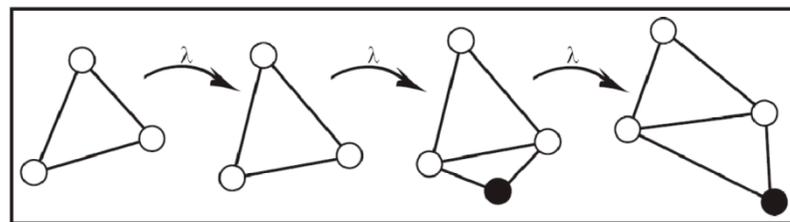


Figura 1.2. Proceso de crecimiento de una red GCS.

Visualización y Clustering: Tanto el análisis de *visualización* como el de *clustering*, son del tipo “no supervisado”, es decir, se trabaja sólo con la información que provee el conjunto de datos a analizar, minimizando la subjetividad del experimentador.

La etapa de visualización de los datos provee de una herramienta importante para la toma de decisiones en el desarrollo del problema. A través de ella se obtiene una expresión gráfica de las interrelaciones entre datos, lo que deriva de la traducción del problema desde un espacio de N dimensiones (dependiendo de la base de datos utilizada) a un espacio de dos dimensiones. Dado esto, es posible determinar visualmente las posibles clases representadas por el conjunto de datos y cuáles de ellos aparecen más interconectados.

La etapa de Clustering tiene por objeto obtener en forma no supervisada, a partir de la totalidad de datos del problema, los distintos grupos de datos interrelacionados o “clusters”. El producto resultante de las GCS corresponde a un conjunto de nodos o clusters, cada uno interconectado al menos con otros dos nodos. Cada nodo representa un subconjunto de muestras que presentan comportamiento geoquímico similar de acuerdo a los datos que se analizan.

El software utilizado en la construcción de las redes corresponde a “*Growing Cell Structures Visualisation (GCSVIS) Toolbox*”, cuyo código base fue desarrollado por Andrew J. Walker, Dr. Robert F. Harrison y el Dr. Simon S. Cross del Departamento de Control Automático y Sistemas de Ingeniería y Patología de la Universidad de Sheffield en Reino Unido (Walker et

al., 1999; citado en Lacassie y Ruiz-Del-Solar, 2010); al cual se le adicionó un código adicional desarrollado en Matlab por J. Lacassie de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

1.4.5 Diagrama de multielementos

Las concentraciones de las REE en las rocas son usualmente normalizadas a una referencia estándar, la que comúnmente consiste en los valores de los meteoritos condriticos. Estos meteoritos han sido elegidos ya que se piensa que están relativamente no-fraccionados desde la formación del sistema solar. Sin embargo, las concentraciones de las REE en el sistema solar son muy variables debido a las diferentes estabilidades de los distintos átomos (Rollinson H., 1993). Las REE con número atómico par son más estables y por ende más abundantes, mientras que aquellas con número atómico impar son más inestables, por lo que se forma un patrón de zig-zag en un diagrama de composición-abundancia. Por esto, la normalización a condritos tiene dos funciones principales: elimina la variación que existe entre los elementos con número atómico impar (en otras palabras, elimina el patrón de zig-zag), y también permite identificar cualquier proceso de fraccionamiento que haya afectado la roca desde su formación (modelo condritico).

Las REE son frecuentemente presentadas en un diagrama de concentración v/s número atómico, en la que la concentración está normalizada al valor de condritico referencial, en escala logarítmica de base 10 plotados en el eje Y v/s el número atómico ordenados por orden creciente. Al unir los puntos de las concentraciones mediante líneas rectas observamos lo que se llama “patrón de REE”, de mucho interés petrológico. Una ocurrencia frecuente en estos análisis es la denominada “anomalía de Eu”. Esta anomalía la podemos cuantificar comparando el valor medido para el Eu con un valor “esperado” que se obtiene al interpolar los valores normalizados de Sm y Gd (esta interpolación se denomina Eu*), y así tenemos que la razón Eu/Eu^* corresponde a la anomalía de Eu. Un valor mayor que 1 indica una anomalía positiva, mientras que un valor menor a 1 indica una anomalía negativa.

Las dificultades con la normalización a condritos está en que la concentración condritica es variable, por lo que se han propuesto un gran número de sets de valores normalizadores, e incluso se han presentado los valores no estandarizados. Algunos autores usan un valor “condritico promedio”, mientras que otros prefieren usar los condritos “C1” como los más representativos de la composición original de la nebulosa solar. En este trabajo se ha utilizado el de Sun and McDonough (1995) dado la confianza de estos valores por diferentes científicos (Rollinson H., 1993).

1.4.6 Ubicación y Accesos

El yacimiento El Teniente se ubica en la Cordillera de los Andes de Chile Central, en la VI Región del Libertador Bernardo O’Higgins, Provincia del Cachapoal, a 37 km al NE de la ciudad de Rancagua y 73 km al SE de la ciudad de Santiago. Sus coordenadas geográficas son 70°21’ longitud oeste y 34°14’ latitud sur (Figura 1.1). La altitud media es de 2302 metros, entre las cotas 1980 (actual nivel de transporte principal) y 2625 m (área actual más alta de la mina). Sin

embargo la antigua cota más alta en la superficie, hoy inexistente debido a la extracción, era de 3120 m.

Para acceder a las instalaciones del yacimiento desde Rancagua se debe seguir la carretera del Cobre (conocida también como Carretera Presidente Eduardo Frei Montalva) que une Rancagua con la localidad de Coya. A 46 kilómetros se sitúa Colón Alto, desde donde se puede acceder a la mina por medio de un ferrocarril eléctrico hacia el nivel 8, el actual nivel más profundo en producción (1.983 m.s.n.m.). El ingreso a los niveles superiores del yacimiento se realiza a través de grandes piques (Pique B, Pique C y Pique 2) que tienen una capacidad de hasta 34T, el cual permite el traslado de vehículos motorizados.

Las oficinas y la mayor parte de las instalaciones que procesan el mineral se ubican en Colón Alto y Colón Bajo. En Colón Alto se ubican los departamentos de Geología, Ingeniería y Planificación. La Planta de Extracción de Cobre por Solventes, y la Bodega de Sondajes se ubican en el sector de Colón Bajo. La fundición del mineral se lleva a cabo en el sector de Caletones. La actividad en estos sectores ocasionalmente inciden en la calidad del aire (Cannell, 2004).

1.4.7 Fisiografía

La morfología de la VI Región de Chile Central es descrita por Charrier (1981) en cuatro fajas de relieve entre los 34° y 34°45' de latitud sur.

La Cordillera de los Andes: Cordón montañoso emplazada en la parte más oriental con altitudes cercanas a los 5.000 m.s.n.m., como el Cerro Cruz de Piedra (4.990 m.s.n.m.) y el Paredones (4.907 m.s.n.m.). Se subdivide en Cordillera Principal y Precordillera.

Valle Central o Longitudinal: También se conoce como Cuenca de Rancagua (Fuenzalida, 1965), corresponde a una depresión tectónica de dirección norte-sur que se encuentra rellena por depósitos cuaternarios que provienen principalmente de la erosión de la Precordillera y la Cordillera Principal. En Rancagua, su altura promedio es de 500 m.s.n.m. (Charrier, 1973).

Cordillera de la Costa: Situada próxima al mar, sin cumbres significativas, cae hacia el litoral formando vastas planicies costeras. Tiene un ancho variable de unos 40 a 60 km., con alturas máximas de 2.000 m.s.n.m. frente a Santiago y Rancagua.

Plataforma Litoral: Planicie de 110 km de largo por 18 a 4 km de ancho, que desciende desde los 140 m de altitud en la base de la Cordillera de la Costa, hasta los 80 m en el borde del acantilado costero.

Además, se reconocen 3 ríos de caudal significativo y regular: Cachapoal, Tinguiririca y Teno (Mataquito).

El Teniente se emplaza en el faldeo occidental de la Cordillera de los Andes, sector conocido también como Precordillera, caracterizado por su menor pendiente y existencia de

valles interiores con microclimas y bosque nativo. El relieve es joven con su morfología actual producto de erosión glaciaria (Charrier, 1973).

1.4.8 Clima, Flora y Fauna

El clima de la región de O'Higgins, es templado a cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (Fuenzalida, 1967). Las temperaturas mínimas promedio en invierno son de -5°C a -6°C y máximas de 32°C en verano. La zona presenta precipitaciones de lluvia y nieve entre los meses de mayo a septiembre.

La vegetación existente corresponde a pequeños arbustos y plantas con formas de cojines y champas gramíneas duras, conocidas como llaretas y coirones respectivamente. Sobre los 2.000 metros sobre el nivel del mar, la presencia de vegetación disminuye hasta desaparecer (Fuenzalida, 1967).

La fauna está conformada por vizcachas (*Lagidium V. Viscacia*), pumas y zorrillos. Las aves presentes en la zona corresponden a algunas especies de patos, la perdiz cordillerana (*Attagis gayi*) y el cóndor (*Vultur gryphus*) (Fuenzalida, 1967).

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geología regional del área de estudio

Entre los 33°45' - 34°45' latitud sur y los 70°00' - 71°00' longitud oeste, el área de estudio se encuentra caracterizada principalmente por potentes secuencias de rocas volcánicas estratificadas, intercaladas con secuencias estratificadas marinas y continentales, generadas a partir del Triásico Superior. Éstas se encuentran intruidas por cuerpos hipabisales y plutónicos de edad Cenozoica, correspondientes a las unidades del Meso-Cenozoico del Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960).

A continuación, se describen las características de las formaciones, secuencias y unidades geológicas que integran la Geología Regional en el que se enmarca el Megayacimiento de Cobre-Molibdeno El Teniente.

2.1.1 Rocas Estratificadas

Klöhn (1960) y posteriormente Charrier (1973 y 1981) definieron para la franja cordillerana las siguientes unidades formacionales:

Formación Nacientes del Teno (Bajociano-Kimmeridgiano inferior): Unidad estratigráfica más antigua. Posee escasa manifestación en el sector del yacimiento. Corresponde a un grupo de rocas sedimentarias clásticas, depositado durante un ciclo marino, que se distribuye discontinuamente en la porción oriental de la región (Charrier, 1973). Subyace concordantemente a la Formación Río Damas (Figura 2.1).

Formación Río Damas (Kimeridgiano superior-Titoniano inferior): Definida por Klohn (1960). Corresponde a intercalaciones de rocas sedimentarias clásticas con potentes series de rocas volcánicas y esporádicos sedimentos químicos, depositados en un ambiente continental. El ambiente de depositación corresponde a terrestre subaéreo y lagunar. Su mayor desarrollo se encuentra en la zona del Río Damas, con una potencia de aproximadamente 3000 m. Sobreyace concordantemente a la Formación Nacientes del Teno, y se dispone en forma concordante y gradual bajo la Formación Baños del Flaco, y limita en contacto por falla con la Formación Leñas-Espinoza (Charrier, 1973) (Figura 2.1).

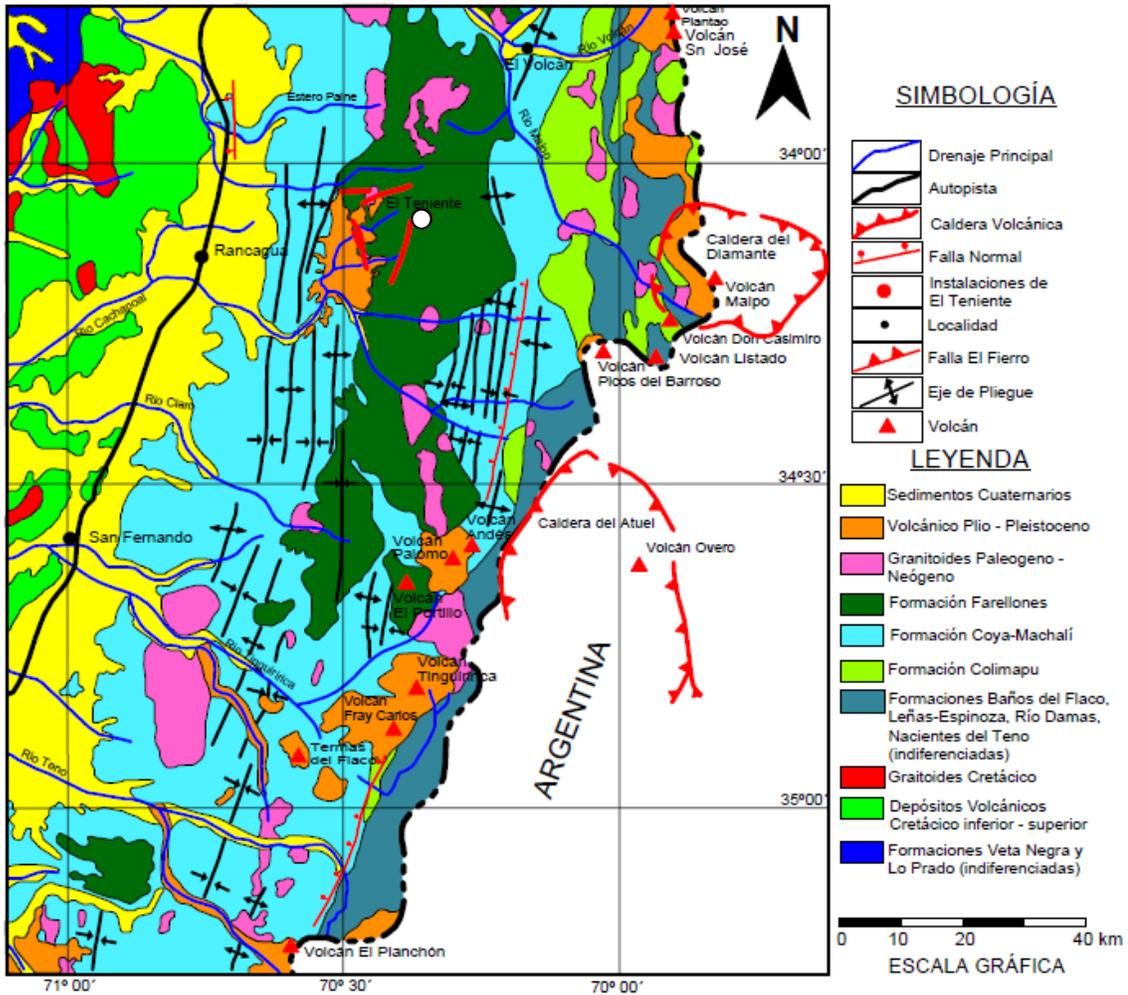


Figura 2.1. Mapa Geológico Regional de la zona de estudio (modificado de Charrier *et al.*, 1996). El área de estudio se encuentra señalada en el mapa con un punto blanco.

Formación Leñas-Espinoza (Kimeridgiano superior-Titoniano inferior): Secuencia de rocas sedimentarias detríticas y calcáreas de carácter transgresivo, con una potencia de 1.200 m (Charrier, 1981), que se distribuyen en afloramientos orientales restringidos, con orientación norte-sur (Figura 2.1). Sus relaciones de contacto están dadas por; un límite inferior desconocido, y hacia el techo una transición gradual a la Formación Baños del Flaco, y discordantemente por la Formación Coya-Machalí. Además presenta localmente un contacto por falla con la Formación Río Damas, considerada como contemporánea.

Formación Baños del Flaco (Titoniana-Neocomiana): Definida por Klöhn (1960) como una unidad compuesta por rocas sedimentarias calcáreas, principalmente marinas, localmente con intercalaciones detríticas y escasos niveles efusivos. Posteriormente, Charrier (1981), asigna a esta formación los Estratos Superiores de la Formación Leñas-Espinoza definida por Klöhn (1960). Su localidad tipo se encuentra en el sector de Baños del Flaco, ubicado en el valle del Río

Tinguiririca, a 1.700 m de altura. En la región su distribución está restringida a pequeños afloramientos de dirección norte-sur, truncados hacia el norte por lavas de un complejo volcánico más moderno, con un espesor promedio de 1.000 m. Los depósitos marinos de la Formación se asocian al segundo ciclo de trasgresión-regresión que cubrió el ámbito de la Cordillera Principal. Estas características se repiten a lo largo de todo el margen occidental de la Cordillera Principal, en donde la Formación recibe diferentes nombres como Formación Lo Valdés en el sector metropolitano (Thiele, 1980), y Formación San José, en el sector del Río Aconcagua.

Sobreyace concordantemente a la Formación Río Damas (Figura 2.1), e infrayace concordante a la Formación Colimapu. Su techo se observa localmente erosionado y cubierto en forma discordante por la Formación Coya-Machalí. En general las rocas de esta formación se encuentra intensamente deformada (Charrier, 1981).

Formación Colimapu (Barremiano-Albiano): Definida por Klöhn (1960) en la quebrada del mismo nombre. Corresponde a un conjunto de rocas estratificadas volcano-sedimentario continentales, que incluye areniscas tobíferas rojizas, lutitas tobíferas y tufitas rojas, que presentan intercalaciones con capas de conglomerados, brechas y lavas andesíticas, calizas y capas de yeso en forma discontinua. Esta Formación se encuentra dividida en dos miembros: Miembro Inferior Sedimentario, compuesto de areniscas finas epiclásticas y calizas de tipo micríticas, con una potencia de 1.500 m; y Miembro Superior Volcánico, compuesto de tobas lítico-cristalinas, rocas de lapilli e ignimbritas, de 1.600 m de potencia (Charrier, 1981). Los depósitos de esta formación se generaron a partir del segundo ciclo sedimentario continental, asociado a una fase de alzamiento durante el Barremiano-Albiano, que culmina con una fase plegada de las unidades del Senoniano en la fase Sub-Hercínica (Charrier, 1973). Se dispone concordantemente sobre la Formación Baños del Flaco, e infrayace concordante a la Formación Coya-Machalí.

Formación Coya-Machalí (Eoceno superior-Mioceno inferior): Dataciones radiométricas K-Ar en muestras de la localidad indican edades de 20,5-23,1 Ma (Charrier y Munizaga, 1979). Klöhn (1960), la define como un conjunto de rocas volcánicas continentales, efusivas y piroclásticas de carácter ácido, con algunas intercalaciones de sedimentos lacustres. Aflora en dos franjas norte-sur, una oriental y otra occidental, de un ancho promedio de 13 km y 20 km respectivamente, las cuales se encuentran separadas por la Formación Farellones (Charrier *et al.*, 1994). La franja occidental corresponde a lavas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas de composición andesítica, y la franja oriental a rocas piroclásticas con intercalaciones importantes de sedimentitas finas (Charrier *et al.*, 1994; Charrier y Munizaga, 1979). La franja occidental posee un espesor de más de 1900 m y la oriental unos 1.300 m de potencia (Figura 2.1).

La Formación Coya-Machalí es correlacionable con la Formación Abanico. Se superpone discordantemente sobre las formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, e infrayace en discordancia angular a la Formación Farellones

Formación Farellones (Mioceno superior): Definida por Klöhn (1960), corresponde a una potente secuencia, predominantemente volcánica, de lavas intermedias a ácidas y rocas piroclásticas, con intercalaciones sedimentarias lagunares tales como areniscas, lutitas, tufitas y delgadas capas de caliza, con un espesor mayor a 2.400 m. Se disponen suavemente plegada a subhorizontal, en discordancia angular, sobre la Formación Coya-Machalí y está localmente cubierta por la Formación Colorado-La Parva (Thiele, 1980).

Se reconoce en afloramientos en una franja de unos 24 km de ancho de orientación norte-sur, que separa a las dos franjas de la Formación Coya-Machalí (Figura 2.1). Sus depósitos serían el resultado de una intensa actividad volcánica, predominantemente andesítica, centrada a lo largo de la franja actual de afloramientos. Dataciones de K-Ar ubican esta formación entre los 15 y 6 Ma (Mioceno Medio y Superior) (Klohn, 1960; Kay y Kurtz, 1995; Godoy et al., 1999).

Formación Colon-Coya (Plioceno-Pleistoceno): Reconocida por primera vez por Enrione (1972), siendo definida recientemente como Formación por Gómez (2001). Corresponde a un conjunto de lahares de granulometría heterogénea, insertos en una matriz arcillo-cinerítica, con intercalaciones locales de niveles de ceniza, coladas andesíticas de poca potencia y gravas fluviales. Su potencia varía entre algunos centímetros a 150 m. Sobreyace en disconformidad a las formaciones Coya-Machalí y Farellones. Su techo corresponde a la actual superficie de erosión. Su edad ha sido asignada mediante dataciones radiométricas K/Ar en lavas, que la sitúa en el rango Plioceno–Pleistoceno (2,3-1,3 Ma) (Charrier y Munizaga, 1979; Cuadra, 1986).

Depósitos no consolidados (Plioceno-Pleistoceno): Corresponden a depósitos aluviales (fluviales, lacustres y glaciofluviales), glaciales, de escombros y derrumbes (Charrier, 1983). Estos depósitos se encuentran rellenando los principales sistemas de drenaje, tales como los valles de los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco.

2.1.2 Rocas Intrusivas

Se reconoce la existencia de al menos cinco franjas de intrusivos agrupados en complejos ígneos intrusivos del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior), con edades que varían entre los 34.3 y 5.59 Ma (Falcón y Rivera, 1998).

Corresponden a cuerpos intrusivos de carácter plutónico e hipabisal de granodioritas, pórfidos dioríticos andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos, con composición, textura y dimensiones variadas que afloran en la región donde se emplaza el yacimiento, con una alineación norte-sur e intruyendo a las formaciones del Mioceno, principalmente a las de Coya-Machalí y Farellones. Cuerpos menores reconocidos en la región, corresponden principalmente a stocks, apófisis, diques y filones que constan de rocas fanerocristalinas y subordinadamente afaníticas y brechas, entre las que se han reconocido granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas (Charrier, 1981).

2.1.3 Estructuras

A escala regional, las características estructurales de Chile Central, entre los 33°S y 39°S, estarían en parte controlados por estructuras regionales NW a NNW, ocasionadas durante los eventos tectono-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy y Lara, 1994). Estas estructuras estarían marcando los límites de los segmentos tectónicos dispuestos de manera oblicua a la cadena andina actual, donde movimientos laterales de los mismos explicarían la distribución de franjas de centros volcánicos e intrusivos del Mioceno en la región (Falcón y Rivera, 1998). En el área, los patrones estructurales habrían sido el resultado de movimientos laterales a lo largo de una zona de transcurrancia sinistral N50°W, generando fracturas sintéticas sinestrales (tipo R), de orientación N60°W y antitéticas dextrales (tipo R'), de orientación N50°E (Falcón y Rivera, 1998) (Figura 2.2).

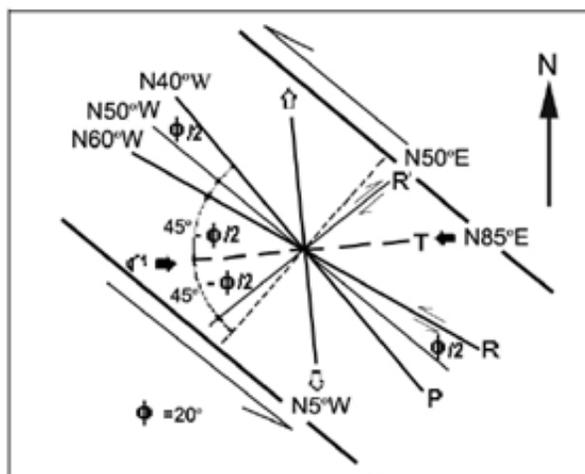


Figura 2.2. Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrancia sinistral de rumbo N50°W, que coincide con la zona de falla Río Blanco-Codegua. Modificado de Falcón y Rivera (1998).

Las características estructurales regionales son:

Plegues: Klöhn (1960) y Charrier (1994) los describen como anticlinales y sinclinales. Presentan un suave buzamiento hacia el sur cuyos ejes de rumbo general norte-sur muestran inflexiones en el rumbo desde N 30° W a N 30° E. Estas estructuras presentan continuidad longitudinal solamente entre los segmentos acotados por sistema de fallas N 30° W (Rivera y Falcón, 2000) (Figura 2.1).

Fallas: Los sistemas de falla consisten en siete zonas de falla orientadas generalmente N 30° W, estas se reconocen tanto en la Cordillera de la Costa como en la cordillera de los Andes. En la Depresión Intermedia, el relleno sedimentario moderno tiende a obliterar la traza de esas estructuras. En torno al yacimiento El Teniente, destacan las zonas de falla Piuquencillo al norte, El Azufre al centro y Juanita al sur (Rivera y Cembrano, 2000), que truncan a los ejes de plegamiento de la Formación Farellones. Charrier (1981), reconoce a lo largo del río Cachapoal

una falla con deslizamiento transcurrente sinistral, la que desplaza a los ejes de pliegues de la Formación Coya-Machalí. Además de intercalaciones de roca incompetentes en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí favorecen el desarrollo de fallas inversas.

2.2 Geología distrital

Las rocas más antiguas dentro de la geología distrital del Yacimiento El Teniente corresponden a las asignadas a la Formación Coya-Machalí (Oligoceno-Mioceno), sobre las cuales se disponen extensas secuencias de rocas volcánicas, volcano-sedimentarias y piroclásticas asignadas a la Formación Farellones (Mioceno), las cuales se encuentran intruídas por diferentes cuerpos plutónicos y brechas hidrotermales (Cuadra, 1986). Las rocas de la Formación Farellones predominan en el área y alojan al yacimiento El Teniente.

2.2.1 Secuencias estratificadas

2.2.1.1 Formación Farellones

Entre Sewell y la cabecera del río Teniente, Howell y Molloy (1960) subdividieron a la Formación Farellones (Mioceno superior) en tres miembros, los cuales están separados entre sí por discordancias angulares de carácter local:

Miembro inferior: Unidad que aflora en las laderas de las quebradas Coya y Teniente, al noreste de Sewell (Ojeda *et al.*, 1980). Corresponde a flujos andesíticos y aglomerados volcánicos que se encuentran intruidos por un stock diorítico, un pórfido dacítico, diques de latita y por lamprófidos. Es el miembro que aloja la mayor parte de la mineralización con una potencia de aproximadamente 2.200m. Su límite inferior no ha sido reconocido en la zona y el límite superior subyace en discordancia angular al miembro medio.

Miembro medio: Sus afloramientos se reconocen hacia la cabecera del río Teniente, compuesto de una alternancia de capas volcánicas andesíticas epidotizadas de color verde e intercalaciones de sedimentos lacustres de color pardo-rojizas. Su potencia aproximada es de 800 m. El límite inferior se encuentra marcada por discordancia angular con el miembro superior. El rumbo de los estratos es variable y su manteo rara vez excede los 30°.

Miembro superior: Reconocido en la ladera oeste de la quebrada Coya, en el cordón de cerros que separan a los ríos Coya y Teniente y en el sector noreste y este del yacimiento. Este, se compone de flujos andesíticos y basálticos con intercalaciones de piroclastos y aglomerados volcánicos, con una potencia de 800 m y con manteos que fluctúan entre los 8° y 12° al sur. Sobreyace en discordancia angular al miembro medio, aunque también se apoya directamente sobre el miembro inferior. Los depósitos no consolidados corresponden a materiales fluvioglaciales, escombros de falda, deslizamientos de roca y suelo reciente. Estos depósitos se disponen en el fondo de valles y en las laderas de las quebradas (Ojeda *et al.*, 1980).

2.2.1.2 Depósitos Laháricos

Corresponde a una unidad compuesta por depósitos no consolidados a semiconsolidados, con espesores que van desde pocos centímetros hasta 150 m, caracterizados por fragmentos de distinta granulometría en una matriz arcilocinérica, de colores pardo-rojizo a amarillento. Dataciones radiométricas K-Ar, arrojan edades entre 2.3-1.3 Ma (Cuadra, 1986), correspondientes al Plioceno-Pleistoceno. Estos depósitos se encuentran en la zona NW y SW, cercanos al yacimiento (Figura 2.3).

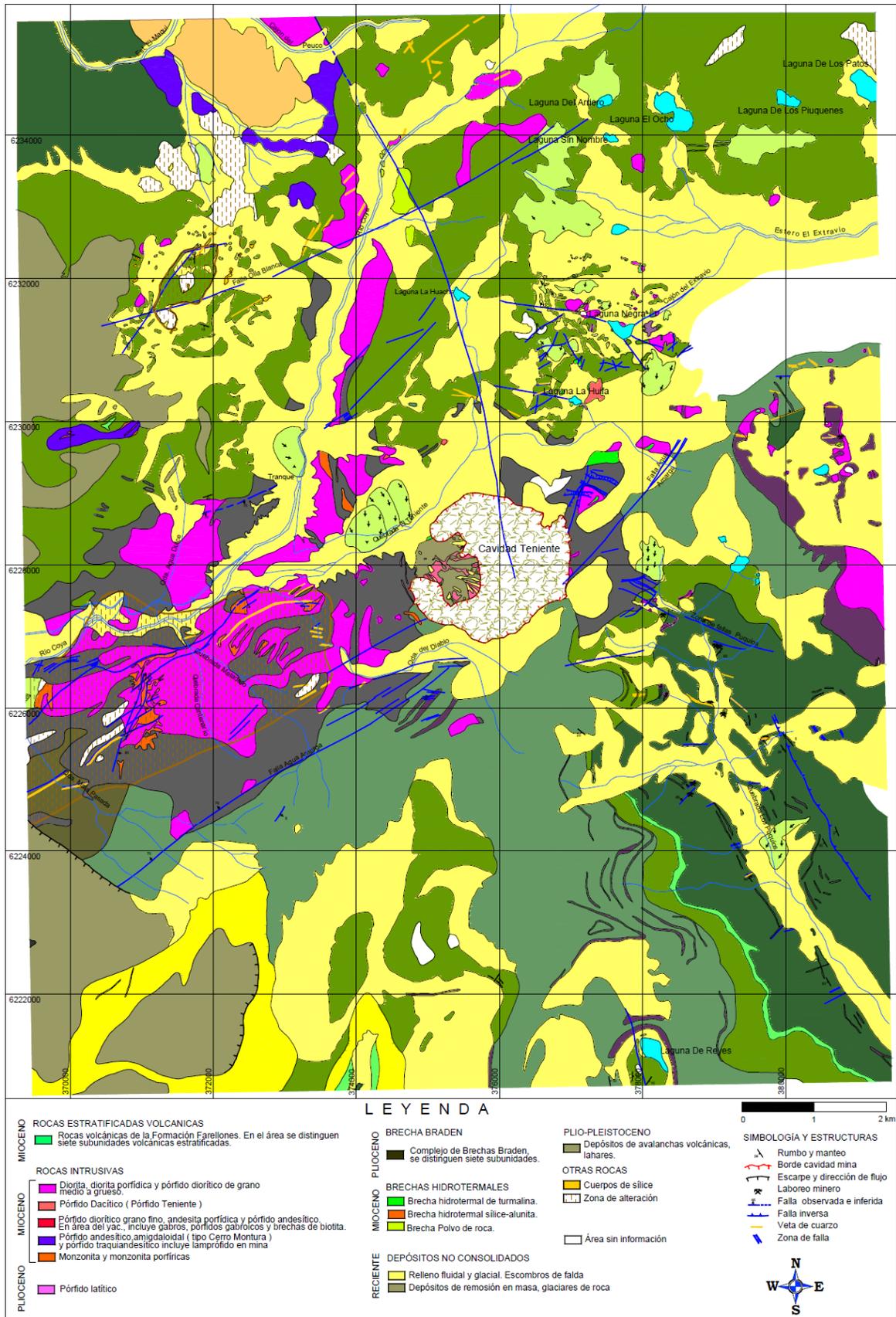


Figura 2.3. Mapa geológico Distrito Teniente. Modificado de Floody y Huete (1998).

2.2.1.3 Depósitos no consolidados

Es la unidad de mayor extensión después de la Formación Farellones. Los sedimentos cuaternarios no consolidados corresponden a materiales fluvio-glaciares, escombros de falda y deslizamientos de roca y suelo, que se disponen en los fondos de valle y laderas de quebradas (Ojeda *et al.*, 1980) (Figura 2.3).

2.2.2 Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas que afloran en los alrededores de Sewell, corresponden a stocks, diques y chimeneas de brechas que se encuentran intruyendo a la Formación Farellones. En el distrito, se han identificado tres grupos de plutones Neógenos, los cuales fueron divididos por edad de emplazamiento (Kurtz *et al.*, 1997).

El primero y más antiguo corresponde a un cuerpo de composición granodiorítica, denominado Plutón La Obra, del Mioceno Inferior (16.6 ± 0.5). Éste, se encuentra intruyendo a la Formación Coya-Machalí. El segundo grupo, ubicado al este, corresponde a plutones de composición granodioríticas denominado Complejo Plutónico El Teniente. Este complejo puede ser dividido en dos familias de plutones, con edades que fluctúan entre los 11 a 12 Ma y entre los 8 a 9 Ma. El tercer grupo, también de composición granodiorítica y ubicado al este del segundo grupo, es el denominado Complejo Plutón Joven, con edades que varían entre 6.6 y 5.6 Ma.

El afloramiento de mayor importancia es el Complejo Plutónico El Teniente, el cual se encuentra claramente controlado por fallas de dirección N65°E a lo largo de 20 km y de unos 6 km de ancho, que aparece en parte truncado por la chimenea de brechas Braden. Este complejo está compuesto por dioritas, granodioritas, pórfidos andesíticos y gabros (Floody y Huete, 1998).

2.2.3 Estructuras

En el área, las estructuras que se distinguen corresponden a pliegues y fallas, que afectan a la Formación Farellones (Gómez, 2001). Ésta, presenta pliegues suaves con ejes de rumbo NNW a NS e inclinaciones de los flancos que no superan los 30°.

A nivel distrital, se reconoce el predominio estructural de fallas con tendencia NE (Figura 2.3) y de centros volcánicos alineados (Falcón y Rivera, 1998). La Formación Farellones se encuentra afectada por fallas normales de rumbo NNW a NS, las que se interpretan como producto de la reactivación de fallas inversas paralelas al plegamiento.

El yacimiento El Teniente, se encuentra emplazado en una compleja zona de cizalle de características distritales de dirección aproximada N60°E, denominada Zona de Falla Teniente (ZFT). Esta zona de falla limita al NW con la Quebrada Teniente y al SE con la falla Agua Amarga (Figura 2.3), y se encuentra relacionada con la principal zona de alteración hidrotermal, que presenta una forma ovalada con su eje mayor en la dirección N60°E, que coincide con la dirección de fallas dextrales tipo R' de la zona de transcurrancia sinistral N50°W (Falcón y Rivera, 1998).

La Chimenea de Brechas Braden ha sido reconocida como la estructura más notable de la zona (Lindgren, 1917; Lindgren y Bastin, 1922; Howell y Molloy, 1960), emplazada en rocas de la Formación Farellones.

2.3 Geología del Yacimiento El Teniente

El Teniente es un mega-yacimiento de cobre y molibdeno cuya producción histórica es de 12.500 M.ton, con leyes de Cu de 0,63% y 0,02% de Mo. Según Sillitoe y Perelló (2005), El Teniente es una de las mayores concentraciones de Cu en la corteza terrestre.

El Teniente es uno de los yacimientos más importantes del país y se incluye tradicionalmente dentro de los yacimientos del tipo pórfido cuprífero. Makshev *et al.* (2004) proponen que se originó por la sucesiva intrusión de cuerpos félsicos, seguida por episodios de mineralización, genéticamente relacionados, cada uno asociado con alteración hidrotermal. Por otra parte, Skewes *et al.* (2002) sugieren que se trataría de un depósito de megabrecha, generado por la exsolución de fluidos magmáticos de plutones en enfriamiento. La formación de vetas tardías, en asociación con el emplazamiento de brechas más jóvenes e intrusiones de pórfidos félsicos, generaron una alteración sericítica que en algunos casos contribuye con Cu y en otros elimina o redistribuye la mineralización preexistente (Skewes *et al.*, 2002). La mineralización es del tipo *stockwork* (Cuadra, 1986), formando un cuerpo mineralizado de forma elíptica en planta. En su parte central se encuentra la mega estructura denominada Brecha Braden, con forma de cono invertido (Cuadra, 1986) y en donde se ubican las instalaciones principales del yacimiento.

Análisis radiométricos muestran que la actividad magmática al interior del yacimiento se desarrolló de manera relativamente continua al menos desde los 8,9 Ma hasta los 3,8 Ma (Cuadra, 1986; Skewes *et al.*, 2005; Makshev *et al.*, 2004). Aún así, se reconocen en superficie unidades volcánicas de hasta 1,8 Ma (Charrier y Munizaga, 1979). Por otra parte, se han registrado episodios de actividad hidrotermal al menos entre 7 y 4,7 Ma (Skewes *et al.*, 2002, 2005; Makshev *et al.*, 2004; Stern y Skewes, 2005; Cannell *et al.*, 2005).

Los minerales de mena más importantes del yacimiento, en la zona primaria, corresponden a la asociación calcopirita-bornita-pirita. En la zona de enriquecimiento secundario, el mineral característico es la calcosina y en forma subordinada covelina, cobre nativo y cuprita. La mineralización de cobre y molibdeno ocurre principalmente en vetillas (70%), resultantes del relleno y sellado de grietas causadas por los procesos de deformación alojadas principalmente en rocas subvolcánicas de composición máfica, y el 30% restante se concentra en el cemento de diversas brechas magmático-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina, y en menor proporción, diseminada en la matriz de los cuerpos intrusivos félsicos (Cuadra, 1986).

En la mina se reconocen tres sistemas estructurales preferenciales: NS, NNW y NE, con continuidad distrital, evidenciados por la traza de los contactos entre unidades de roca diferentes, por fallas y zonas de cizalle y, por la distribución y geometría de las vetas y vetillas.

2.3.1 Litología

2.3.1.1 Complejo Máfico El Teniente (ex Andesitas de la Mina)

El concepto de Complejo Máfico lo introduce Skewes (2002). Bajo esta denominación se agrupan a un conjunto de rocas oscuras del Mioceno Superior (Munizaga y otros, 2002). Corresponde a un complejo subvolcánico de composición básica y afinidad toleítica (Skewes, 1997). Este complejo agrupa a gabros, diabasas, pórfidos basálticos (Burgos, 2002; Skewes *et al.*, 2002), que han sido mal definidas como “Andesitas de la Mina” en el pasado (Camus, 1975; Ojeda y otros, 1980; Cuadra 1986). Su extensión en la vertical es de más de 2 km, intruyendo en forma de lacolito a la Formación Farellones (Skewes y Arévalo, 1997; Munizaga *et al.*, 2002). La edad de exhumación es de $8,9 \pm 2,8$ Ma, obtenida mediante trazas de fisión en apatito (Maksaev *et al.*, 2004).

El Complejo Máfico El Teniente (CMET) es la unidad litológica de más amplia distribución en el yacimiento (Figura 2.4), y es donde se aloja el 80% de la mineralización (Camus, 1975). Son rocas de coloración gris-pardo a negro generada por la intensa alteración potásica que la afecta, siendo la biotita el mineral predominante (Villalobos, 1975), presentando textura afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasa (Cuadra, 1986). Estudios realizados por Burgos (2002), confirman que parte de este complejo corresponde a una diabasa de textura porfídica con variaciones en el tamaño de los fenocristales de plagioclasa. Las texturas de grano fino corresponderían a los márgenes del intrusivo y las de grano grueso al centro de éste. En general, se encuentra constituido por plagioclasa, relictos de piroxeno y presenta una fuerte alteración biotítica (Burgos, 2002).

La alteración, mineralización de cobre-molibdeno y brechización del complejo, obliteran macroscópicamente las características texturales originales de las rocas. Los minerales de alteración principales son: biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita, y turmalina (Skewes, 2002).

Las diabasas y diques basálticos que conforman el CMET, habrían sido emplazadas durante el Mioceno. En este período una cuenca volcano-tectónica fue generada en el Arco Andino, por la extensión a partir de un sistema de fallas de orientación NNW, cerrándose en el Mioceno Tardío (Godoy, 1993; Falcón y Rivera, 1998).

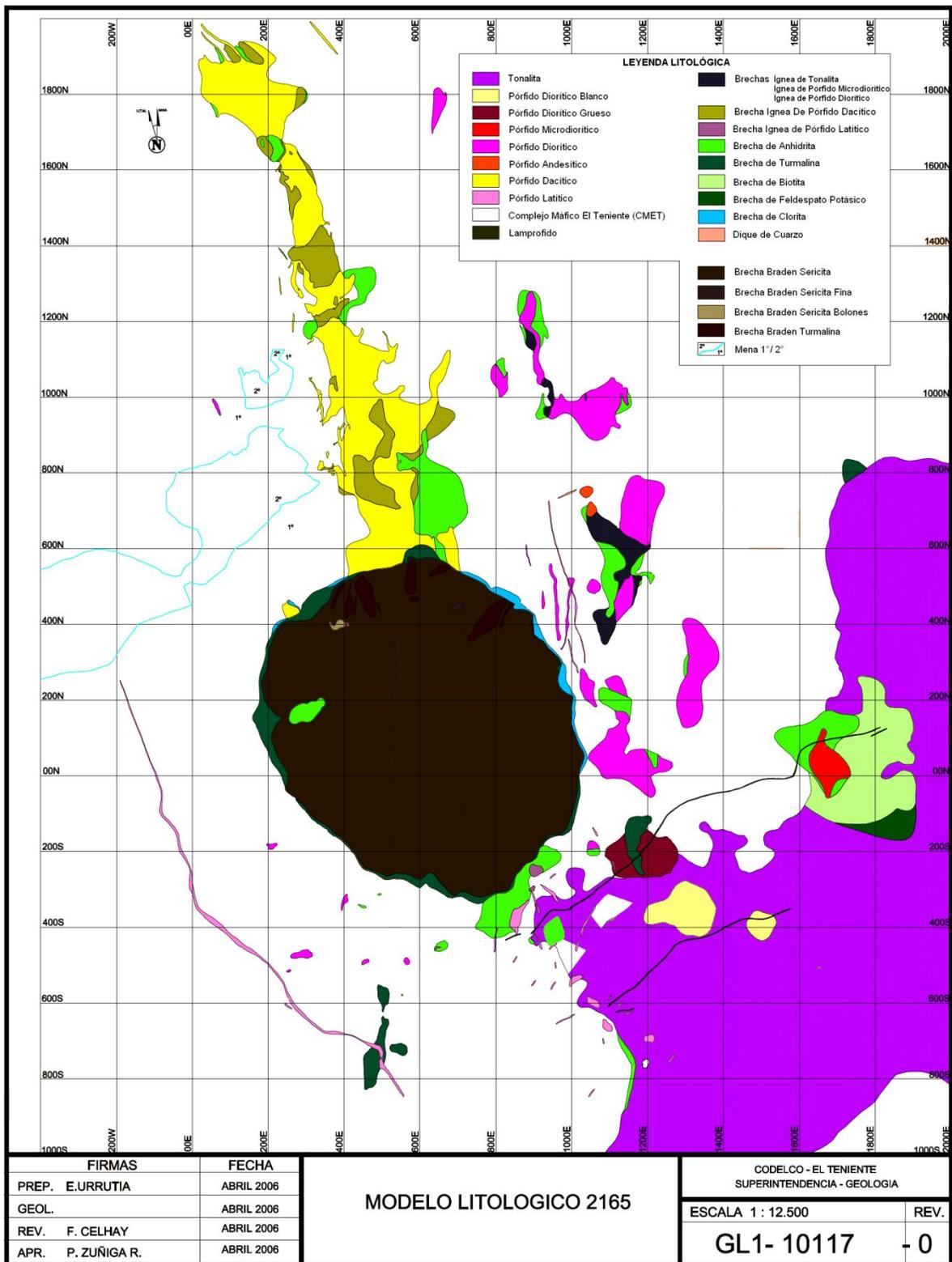


Figura 2.4. Mapa Geológico con las principales unidades litológicas del Yacimiento El Teniente, nivel 2165 m.s.n.m. (Modificado de plano GL1-10117-0, División El Teniente-Codelco-Chile).

2.3.1.2 Complejo Félsico

Corresponde a un conjunto de intrusivos subverticales de edad Mioceno- Plioceno, con forma de stocks, apófisis relativamente tabulares y diques. Son de afinidad calcoalcalina y presentan un contenido de SiO₂ superior a 56%. Según “Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/03, 2003), se les conoce como:

Pórfido Dacítico: Antiguamente denominado Pórfido Teniente, Dacita Porfídica o Dacita (Cuadra, 1986; Rojas, 2002; Skewes *et al.*, 2002). Corresponde a un cuerpo intrusivo tabular, subvertical y de orientación general norte-sur, que se ubica en la parte norte del yacimiento (Figura 2.4). Intruye al Complejo Máfico El Teniente, presentando contactos nítidos e irregulares, brechosos o bien transicionales. Hacia el sur, el cuerpo se encuentra truncado por la Chimenea Braden, en cuyo contacto se desarrolla una brecha con fragmentos del pórfido y matriz de turmalina. El Pórfido Dacítico es de color gris claro a blanco y se distinguen dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa y la porfídica hipidiomorfa (Ossandón, 1974; Rojas, 2002), con fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo (Cuadra, 1986). Edades U/Pb en circón, indican que la cristalización del intrusivo ocurrió hace 5.28 ± 0.10 Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

Tonalita: También conocida como Diorita Sewell (Skewes *et al.*, 2002), se presenta en el sector SE del yacimiento (Figura 2.4) como un gran cuerpo intrusivo que se encuentra intruyendo al Complejo Máfico El Teniente. Corresponde a un stock de 200 m^2 ubicado en el sector SE de la Brecha Braden y presenta un núcleo fanerítico que grada a porfídico hacia el exterior del intrusivo (Faunes, 1981).

Adicionalmente, como parte de la alteración cuarzo-sericítica de la Tonalita en el yacimiento se han definido los “Pórfido Diorítico Blanco” y “Pórfido Diorítico Grueso”, los que se ubican en el sector sur de la mina y corresponden a facies que muestran una textura porfídica que varía de grano medio a grueso característico. Dataciones ⁴⁰Ar/³⁹Ar en biotita, indican una edad de $5,47 \pm 0,12$ Ma a $5,63 \pm 0,12$ Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

Pórfido Diorítico: Se manifiesta como una serie de stocks y diques menores, alineados en una dirección N30°W en la parte norte y central del yacimiento. Estos últimos, antiguamente denominados Diorita Central (Figura 2.4), poseen una gran extensión en la vertical. Dataciones radiométricas U/Pb en circón, indican una edad de cristalización del intrusivo de 6.11 ± 0.13 Ma a 6.28 ± 0.16 Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

Pórfido Microdiorítico: Corresponde a una diorita de grano fino, con abundantes xenolitos de “andesita” y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994). Antiguamente conocido como Pórfido “A”. Posee contactos con la Tonalita y el Complejo Máfico El Teniente (Figura 2.4), generando un volumen importante de brechas ígneas e hidrotermales que indican altas leyes de cobre. Edades U/Pb en circón, indican que la cristalización de este cuerpo ocurrió hace 6.46 ± 0.11 Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

2.3.1.3 Complejo Brecha Braden

El complejo consiste en una chimenea volcánica, o “pipa”, con forma de cono invertido, con su flanco oriental subvertical mientras que el resto posee una inclinación entre 60° y 70° hacia el centro del cuerpo (Cuadra, 1986). Su máximo diámetro, medido en superficie es de 1200 m y una extensión en profundidad reconocida de más de 2150 m, desde la superficie (3140 m.s.n.m.). La porción central de esta mega estructura está conformada por un conjunto de brechas, agrupadas bajo el nombre de Brecha Braden. La chimenea de brecha Braden se formó en un evento sinmineralización, probablemente relacionado en el tiempo a la inyección de diques anulares a los $4,82 \pm 0,09$ Ma (U-Pb en circón). Subsecuentemente ocurrió alteración hidrotermal cuarzo-sericítica dentro y en la periferia de la chimenea de $4,81 \pm 0,12$ a $4,37 \pm 0,10$ Ma (40Ar/39Ar en sericita) (Maksaev *et al.*, 2004).

Dentro del complejo de brechas se encuentran dos grandes unidades geológicas:

Unidad Brecha Braden: Denominada también “concreto” (Cuadra, 1986), está constituida por brechas con fragmentos redondeados a subangulosos de mala selección de composición principalmente andesítica, diorítica, dacítica y latítica de tamaños variables. Posee en general una baja ley mineral, pero presenta una mineralización y alteración hipógena propia, en una matriz de polvo de roca y un cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros, principalmente pirita.

Unidad Brecha Marginal: Tiene forma de anillo que rodea a la unidad brecha Braden, con un espesor promedio de 50 m a 60 m, disminuyendo en profundidad, hasta unos 10 m (Cuadra, 1986). El contacto con la unidad brecha Braden es gradacional, el cual se reconoce por la variación en porcentaje de turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). Está constituida por fragmentos angulosos a subangulosos de variada litología, con grados variables de alteración cuarzo-sericita-clorita y con cantidades menores de anhidrita, yeso, sulfuros y sulfosales de la serie tenantita-tetraedrita. El cemento corresponde a turmalina y cuarzo principalmente, y menores cantidades de anhidrita, yeso, carbonatos, sulfuros y minerales de la serie tenantita-tetraedrita. La mineralogía de mena corresponde a calcopirita, bornita, tenantita - tetraedrita y pirita.

2.3.1.4 Cuerpos de Brechas

Las brechas en El Teniente son clasificadas de acuerdo a los minerales que componen su matriz. De esta manera, Arredondo (1994) reconoció varios cuerpos de brecha:

Brechas de anhidrita: Se ubican en el sector NE y SE del yacimiento. Los fragmentos son polimícticos de rocas máficas y félsicas alteradas. El cemento es principalmente de anhidrita con menores cantidades de cuarzo, calcopirita, pirita y molibdenita. La formación de estos cuerpos sería sincrónica con la etapa de alteración y mineralización tardimagmática.

Brechas de turmalina: Corresponde a una brecha polimíctica, donde el componente más abundante en el cemento es la turmalina, acompañada de anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Los fragmentos corresponden a rocas máficas y félsicas alteradas. Los cuerpos de brecha

de turmalina, se concentran preferentemente en el sector norte de la Chimenea de Brechas Braden.

La brechización con cemento de turmalina y anhidrita se habría producido entre las etapas de alteración y mineralización tardímagmática e hidrotermal principal y la adición de turmalina se asociaría a la etapa hidrotermal principal. Las brechas de turmalina y cuarzo, engloban solo fragmentos de rocas máficas, cuya formación se relaciona con la etapa de alteración y mineralización tardía.

Brechas de biotita: El cemento es de biotita y en forma subordinada está compuesto por plagioclasa ± cuarzo ± bornita-calcopirita ± anhidrita ± yeso y también polvo de roca. Los fragmentos de las rocas intrusivas máficas o félsicas están fuertemente biotitizados y los minerales máficos han sido reemplazados totalmente por biotita. La biotitización está asociada con la infiltración de numerosas vetillas de biotita (Skewes, 1999 y Skewes, 2000).

Brechas Ígneas: Se ubican preferentemente en los contactos entre el CMET y los pórfidos del Complejo Félsico que lo intruyen, desarrollándose potencias desde centímetros hasta decenas de metros. Si en la matriz es dominante la biotita, son llamadas brechas ígneas andesíticas, en cambio si la matriz es de color más claro, porque contiene menos biotita y más anhidrita, feldespatos y cuarzo, entonces son llamadas brechas ígneas dacíticas o dioríticas en función del contenido de cuarzo y feldespatos.

2.3.1.5 Intrusivos Menores

Corresponden a diques y cuerpos filonianos que representan los últimos eventos intrusivos en el yacimiento. Son unidades parcialmente estériles y de ocurrencia más restringida y volumétricamente menos importantes.

Pórfido Latítico: corresponde a diques anulares de poca potencia de latita porfídica (Howell y Molloy, 1960), aledaños a la Chimenea de Brecha Braden. Son cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. Contienen un 40% de fenocristales de feldespatos y biotita. La edad K/Ar, de $4,96 \pm 0,25$ Ma, indica que su existencia es previa a la Brecha Braden (Riveros, 1991).

Diques de Lamprófito: cuerpos tabulares de color gris verdoso, de textura porfídica fina con fenocristales aciculares de hornblenda, en una masa fundamental traquítica compuesta por microlitos de augita y labradorita. Se ubican al sur de la Chimenea de Brechas Braden, con potencia variable de 1 a 2 m, manteo sub vertical y alta continuidad en el rumbo. Cortan las rocas máficas, diorita Sewell y a la Chimenea de Brechas Braden, con contactos nítidos. Dataciones K-Ar en roca indican una edad de 3,8 a 2,9 Ma (Cuadra, 1986 y Godoy, 1993).

2.3.2 Geología estructural del Yacimiento

El Yacimiento El Teniente se encuentra emplazado en una zona de cizalle denominado “Zona de Falla El Teniente (ZFT)”. Está compuesto por sistemas estructurales con tres

direcciones preferenciales: N46°E (Sistema NE-SW), N64°W (Sistema NW-SE), ambas de manteo subvertical y un tercero de dirección N20°E dispuesto en echelón respecto a los anteriores. En estas direcciones se alinean diques, fallas, vetillas y diaclasas. Estos sistemas son interpretados como el producto del tectonismo regional del tipo compresivo-distensivo, generados por un eje de esfuerzo máximo de dirección aproximada EW, el que originó sistemas de fallas y diaclasas NE-SW y NW-SE. Por relajación elástica posterior a la compresión, se habrían formado diaclasas de tensión e intrusiones de dirección NS. El emplazamiento de una serie de cuerpos ígneos porfídicos, según la franja regional de dirección NS, habría dado origen al yacimiento (Ojeda *et al.*, 1980).

Los sistemas N46°E y N64°W, forman entre sí un ángulo de 70° aproximadamente, y se considera que estos sistemas fueron determinantes en la formación del depósito y en el emplazamiento de la Brecha Braden, ya que se encontraban activos antes, durante y después a la formación del depósito.

La Chimenea de Brechas Braden se habría emplazado en una zona de debilidad estructural (Ojeda *et al.*, 1980). En torno a ella, existen estructuras sobreimpuestas de características lineales y cónicas. Entre las estructuras lineales se encuentran fallas de dirección principalmente NE-SW y en menor proporción de dirección NW-SE. Entre las cónicas se agrupa un conjunto de diques concéntricos a la chimenea que mantean hacia el ápice de ésta (diques de latita y lamprófido).

Las estructuras más relevantes que se reconocen en el yacimiento se asocian al sistema principal de fallas de dirección NE-SW. Estas estructuras poseen espesores variables (5 a 120 cm), con corridas entre 100 y 500 m, las que han sido denominadas Falla N, N1, N2, P, P1 y Sursur.

Las estructuras asociadas a la mena primaria se caracterizan por ser selladas. Un gran porcentaje de éstas, tienen trazas inferiores a 4 m; conformando un denso enrejado (stockwork). Además de las estructuras mineralizadas, se observan fracturas no mineralizadas, las que poseen un intenso lajamiento (*Sheeting*), con escasa inclinación y distribuidas en los sectores periféricos de la Chimena de Brechas Braden.

2.3.3 Alteración y mineralización

El yacimiento El Teniente se formó en un proceso continuo de alteración y mineralización. Los eventos de formación del yacimiento se dividen en tres etapas: hipógenas, llamadas Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía, y una etapa posterior Supérgena (referencia interna SGL-I-123/03. 2003). En la etapa Hidrotermal Tardía se incluye la anteriormente denominada Alteración Póstuma, restringida a la Brecha Braden. Cada etapa de alteración tiene asociada la generación de diferentes tipos de vetillas, en cuanto a relleno, espesor y persistencia.

2.3.3.1 Etapa Tardimagmática (TM)

Es la primera etapa de alteración-mineralización conocida en el yacimiento y se caracteriza por la coexistencia en equilibrio de una alteración biotítica penetrativa y la presencia de un intenso enrejado de vetillas rellenas con cuarzo, anhidrita, sulfuros, biotita y feldespato potásico. La mineralización metálica consiste en bornita, calcopirita, pirita y molibdenita (Arévalo *et al.*, 1998).

De acuerdo a Cuadra (1986), esta etapa se asocia a las últimas fases de consolidación de la Diorita Sewell y del Pórfido Teniente (Pórfido Dacítico). Esta alteración conforma zonas de mayor intensidad en un esquema concéntrico al Pórfido Dacítico en la zona norte del yacimiento, y las asociaciones potásicas gradan a asociaciones propilíticas hacia los márgenes del yacimiento.

Las vetillas de esta etapa se caracterizan por ser ondulosas o plano-ondulosas, y por no presentar halo o por presentar un halo silíceo y/o biotítico generalmente simétrico. En esta clase se agrupan ocho clases de vetillas de espesor variable (Tabla 2.1.). Las vetillas TM constituyen prácticamente el total del stockwork más fino que caracteriza a las rocas del yacimiento

2.3.3.2 Etapa Hidrotermal Principal (HP)

Esta etapa de alteración cuarzo-sericítica se sobreimpone a la anterior y está relacionada posiblemente a la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas (Cuadra, 1986). En esta etapa se desarrollan vetillas de sulfuros, cuarzo y anhidrita con halos de alteración de cuarzo, sericita y clorita de ancho variable. La mineralogía principal de las vetillas consta de cuarzo, calcopirita, pirita, sericita, clorita, anhidrita y molibdenita.

En la Diorita Sewell y el Pórfido Dacítico, el feldespato potásico, plagioclasa y ferromagnesianos se encuentran alterados en forma similar y la textura original fanerítica y/o porfírica es reemplazada por una textura sacaroidal fina.

Las vetillas agrupadas en esta categoría son en general continuas, planares y con caras paralelas. Presentan halos simples o complejos (doble halo), a veces mineralizado. En esta categoría se agrupan 4 clases de vetillas (Tabla 2.1).

2.3.3.3 Etapa Hidrotermal Tardía (HT)

Esta etapa se relaciona con el emplazamiento de la Brecha Hidrotermal de Turmalina, en disposición anular marginal, alrededor de la Brecha Braden, y se extiende a unos 100 o 150 m en una zona concéntrica a esta (Villalobos, 1975). Las vetillas HT se caracterizan por poseer un mayor grado de complejidad y variabilidad mineralógica con o sin sulfuros que se diferencian de las anteriores etapas por la ocurrencia de nuevos minerales no metálicos y metálicos. La mineralogía no metálica de la alteración está compuesta por la asociación anhidrita-cuarzo-turmalina-sericita-yeso-carbonatos-clorita, y la metálica consiste en calcopirita-bornita-pirita-molibdenita-tennantita/tetraedrita con blenda y galena ocasional (Tabla 2.1). Las vetillas HT presentan halos bien desarrollados y muy irregulares de silicio sericítico clorítico.

En esta etapa se incluye la Alteración Póstuma, la cual está relacionada con fluidos hidrotermales asociados a la formación de la Brecha Braden (referencia interna SGL-I-123/03. 2003). Ésta corresponde a una alteración sericita-calcita, restringida a la Brecha Braden, que se evidencia en la ocurrencia de vetillas de poca frecuencia que afectan a la matriz y a los clastos de la brecha. Su mineralogía principal consiste de sericita, calcita, yeso, cuarzo, siderita, ankerita, baritina, anhidrita, turmalina, pirita, calcopirita, molibdenita, blenda, galena y tennantita (Ojeda *et al.*, 1980).

Tabla 2.1. Clasificación de vetillas en el yacimiento El Teniente. Los números representan: 1=Microvetillas; 2= Vetillas; 3=Vetas (Estándares y Metodologías para geología de Minas, 2003).

TABLA DE CLASIFICACION DE VETILLAS DE EL TENIENTE						
Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía Distintiva	Halo	Características Diagnósticas	Tipo	
CATEGORÍA TM	V1	mt ±qz ±bio ±(anh) ±(cpy) ±(clo)	mt	Silicio	Magnetita, Halo deslavado	1 a 2
	V2	qz-bio-anh-clo ±cpy ±py ±bo ±(moly)	qz-bio	Sin halo	Sin halo, Bordes nítidos, mineralogía qz-bio	2
	V3	qz-bio-anh-clo ±cpy±py±bo	qz-bio-clo	Halo silicio o silicio – clorítico, a veces con biotita diseminada.	halo silicio difuso o sinuoso (tipo nube), mineralogía distintiva qz-bio-clo. Puede presentar la bio-clo en sutura o bandas	1 a 2
	V4	anh ±bio ±cpy ±(moly) ±(bo) ±(qz)	anh mayoritaria	Halo silicio-biotítico	Anhidrita, halo característico	1 a 2
	V5	qz ±anh ±bio ±cpy ±moly ±bo ±(py) ±(clo)	qz mayoritaria	Sin halo	Vetilla de bordes nítidos, sin halo, Stockwork denso, sulfuros diseminados o en sutura central	1 a 3
	V6	anh ±qz ±bio ±cpy ±moly ±bo ±(py) ±(clo)	anh mayoritaria	Sin halo	Vetilla de bordes nítidos, sin halo, Stockwork denso, sulfuros diseminados	1 a 3
	V7	cpy y/o bo y/o py y/o moly ±anh ±qz ±bio	sulfuros mayoritarios	Sin halo	Vetilla de bordes nítidos, sin halo, Stockwork denso. De ser microvetillas, los sulfuros se alternan con bio (segmentadas).	1 a 3
	V8	tur ±anh ±qz ±(cpy) ±(moly) ±(bo) ±(py)	tur mayoritaria	Sin halo	Vetilla de bordes nítidos, sin halo.	1 a 2
CATEGORÍA HP	V9	mt ±cpy ±py ±moly ±qz±anh	mt mayoritaria	Halo sericítico-clorítico, puede presentar calcopirita y/o pirita diseminada.	Halo simple ó asimétrico con ó sin clo diseminada.	1 a 3
	V10	cpy y/o py ±qz ±anh ±moly	cpy y/o py mayoritaria	Halo sericítico-clorítico, con calcopirita y/o pirita diseminada.	Halo bandeado ó simple con sulfuros diseminados	1 a 3
	V11	cpy y/o py ±qz ±anh ±moly	cpy y/o py mayoritaria	Halo sericítico-clorítico.	Halo bandeado, semi-complejo con bordes difusos. Puede presentar escasos sulfuros diseminados.	1 a 3
	V12	cpy y/o py ±qz ±anh ±moly	cpy y/o py mayoritaria	Halo cuarzo-sericítico-clorítico.	Doble halo ó halo complejo con mineralización diseminada	1 a 3
CATEGORÍA HT	V13	cpy-bo-moly-tete-py ±qz ±anh ±cb ±tur ±(ys) ±(clo)	sulfuros mayoritarios	Halo silicio sericítico clorítico	Variedad mineralógica de sulfuros, Halo desarrollados y difusos	2 a 3
	V14	cb y/o ys y/o anh ±cpy ±clo ±bo ±moly ±(tete) ±(qz)	carbonatos y sulfatos	Halo silicio sericítico clorítico	Halo desarrollados y difusos. Variedad mineralógica. Carbonatos y Sulfatos	2 a 3
	V15	tur-anh ±cpy ±cb ±ys ±qz ±py ±ep ±(bo) ±(moly) ±(tete)	tur mayoritaria	Halo silicio sericítico clorítico	Halo desarrollados y difusos. Variedad mineralógica. Turmalina abundante	1 a 3

2.3.3.4 Etapa Póstuma

Está relacionada a la consolidación de la Brecha Braden y se caracteriza por una asociación mineralógica constituida fundamentalmente por sericita, calcita y pirita en el cemento, y por la alteración sericítica de la fracción clástica. También existe un relleno de estructuras planares y de cavidades, con minerales de baja temperatura tales como yeso, siderita, ankerita, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización hipógena se encuentra en vetas y vetillas de pirita, calcopirita, tenantita-tetraedrita, molibdenita y galena-esfalerita, con anhidrita como mineral de ganga predominante y de manera subordinada cuarzo, turmalina, yeso y carbonatos. Como minerales secundarios se encuentran sericita, clorita y calcita junto con disseminaciones de pirita y calcopirita.

2.3.3.5 Etapa Supérgena

Los rasgos distintivos de esta etapa se reconocen en las partes altas del yacimiento, en un área de 15 km² formando una elipse de eje mayor noroeste (Camus, 1974, y Ojeda *et al.*, 1980). Se caracteriza por la lixiviación total de la anhidrita y por la presencia de caolinita, con menor proporción de montmorillonita, alunita y sericita. Por otra parte, Álvarez (1990) postula que los sectores en que se desarrolla la alteración supérgena en el yacimiento coinciden con las zonas de enriquecimiento secundario, cuyo desarrollo alcanza en el sur espesores variables entre 300 m y 500 m. La mineralización corresponde a calcosina gris, calcosina celeste y covelina, que reemplaza a los sulfuros preexistentes a partir de fracturas, bordes de granos y clivaje. Se presenta tanto en vetillas como disseminada, reconociéndose claramente un enriquecimiento selectivo de minerales de cobre, proceso en el cual se reemplaza primero la bornita, luego la calcopirita y la pirita se presentan inalteradas. Su desarrollo sigue el borde de la Brecha Braden y el Pórfido Dacítico hacia el norte, hasta desembocar en la Quebrada Teniente (Floody y Huete, 1998).

3 TIERRAS RARAS

El nombre “Tierras” proviene de la antigua denominación que antes se daba a los óxidos, mientras que el término de “raras” se originó del siglo pasado y se refiere a las dificultades que existen en los procesos de separación entre ellas para ser usadas (Castor *et al*, 2006).

El primer elemento de la lista de las tierras raras fue descubierto por el químico finlandés Johan Gadolin en 1794, después de recibir y analizar un mineral pesado de la aldea sueca de Ytterby (Rowlatt, 2014). El Anexo A expone la lista cronológica del descubrimiento de las distintas tierras raras junto a su radio iónico estimado.

3.1 Química

Las tierras raras (REE: *Rare Earth Elements*), comprenden un grupo de elementos químicos de la serie de los lantánidos, integrado por las tierras raras ligeras (LREE: lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario y europio) y las tierras raras pesadas (HREE: gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio). Generalmente también se incluyen entre ellas al itrio y al escandio (Figura 3.1) (Zygmunt *et al*, 2000).

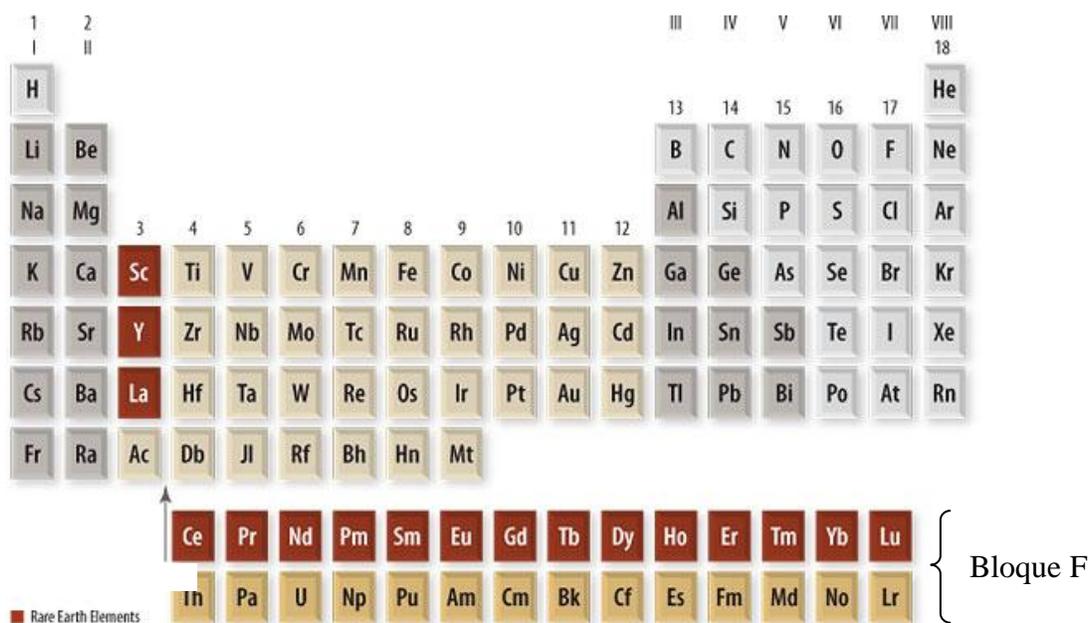


Figura 3.1. Elementos que conforman las tierras raras dentro de la tabla periódica (Fuente: www.tre-ag.com).

Las tierras raras forman óxidos e hidróxidos con los elementos del bloque F de la tabla periódica. Estos elementos tienen radios iónicos muy parecidos y muestran comportamientos químicos igualmente semejantes que hacen difícil su separación (García, 2015).

Son elementos incompatibles, con un radio iónico elevado, y grado de oxidación III. Samario, europio e yterbio también pueden encontrarse inestablemente con el grado de oxidación II, mientras que cerio, praseodimio y terbio pueden ocurrir con el grado de oxidación IV. Al presentar radios semejantes con estados de oxidación similares, permiten la sustitución entre sí en diversas redes cristalinas (Zygmunt et al, 2000).

La principal diferencias entre estos elementos es su radio iónico, con sus diferentes números de coordinación, para las LREE $9 < CN < 11$, para las HREE, $7 < CN < 9$. Esto indica que HREE y LREE no pueden encontrarse simultáneamente en proporciones cercanas en una misma estructura cristalina, es decir, en un mismo tipo de mineral. El Anexo B entrega información de las características físico-químicas de los elementos de tierras raras (Calas, 2014).

3.2 Abundancia

Se podría pensar que el nombre de tierras raras trataría de elementos con escasa abundancia en la corteza terrestre, pero esto no es así. La abundancia en la corteza terrestre de REE varía remarcablemente, siendo las tierras raras livianas más abundantes que las pesadas. Algunos elementos, como el cerio, el itrio y el neodimio son más abundantes que el plomo (Figura 3.2). El tulio, que es el más escaso, es tan frecuente como el bismuto, y más abundante que el arsénico, cadmio, mercurio o selenio. Los lantánidos con bajo número atómico son, generalmente, más abundantes en la corteza terrestre que los con alto número atómico. El elemento radiactivo prometio no se halla naturalmente en la tierra, sino que se forma en los reactores nucleares.

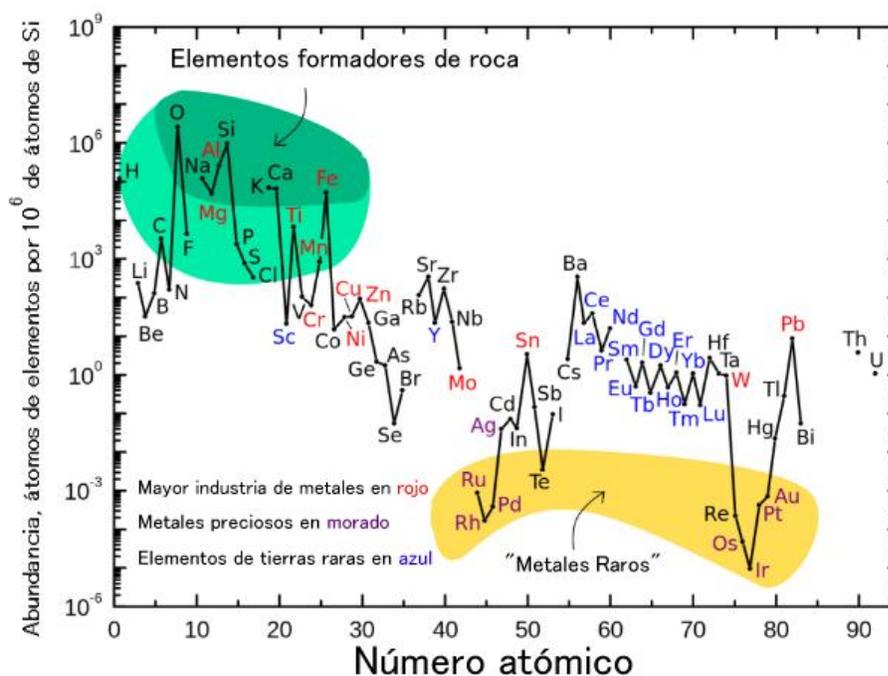


Figura 3.2. Abundancia de elementos en la corteza terrestre (U.S. Geological Survey, 2005).

3.3 Minerales portadores de REE

Los depósitos de tierras raras se presentan en rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, siendo estas últimas las más importantes. La mineralización y distribución de tierras raras en depósitos metálicos es consecuencia de procesos hidrotermales. Se pueden encontrar en rocas ígneas, asociados a carbonatitas y a rocas peralcalinas, depósitos de placeres y depósitos residuales de alteración.

A pesar que las REE se encuentran dentro de la estructura de variados silicatos, como el granate, las plagioclasas o la pumpellyita, sus concentraciones no son del todo relevantes desde el punto de vista económico, considerando además que su extracción es compleja en estos minerales. En este sentido, tienen una mayor relevancia otro tipo de minerales, tales como los fosfatos y los carbonatos. Así, las principales menas de REE, corresponden a los minerales de monacita ((REE,Th,Y)PO₄) y xenotimo, ambos fosfatos, bastnasita (REE(CO₃)F)-carbonato) y allanita (Ca(Ce,La,Y)(Al₂Fe²⁺)-silicato). La Tabla 3.1 presenta los minerales de tierras raras con un alto potencial económico.

Tabla 3.1. Minerales que presentan tierras raras con un alto potencial económico. Los nombres están escritos en inglés, dado que no todos cuentan con la traducción al español.

Mineral	Formula*	Óxidos de tierras raras
		wt %† ‡
Aeschynite	$(\text{Ln,Ca,Fe,Th})(\text{Ti,Nb})_2(\text{O,OH})_6$	36
Allanite(orthite)	$(\text{Ca,Ln})_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	30
Anatase	TiO_2	3
Ancylite	$\text{SrLn}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$	46
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$	19
Bastnasite	LnCO_3F	76
Brannerite	$(\text{U,Ca,Ln})(\text{Ti,Fe})_2\text{O}_6$	6
Britholite	$(\text{Ln,Ca})_5(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH,F})$	62
Cerianite	$(\text{Ce,Th})\text{O}_2$	81§
Cheralite	$(\text{Ln,Ca,Th})(\text{P,Si})\text{O}_4$	5
Churchite	$\text{YPO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	44‡
Eudialyte	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6(\text{Fe,Mn})_3\text{Zr}_3(\text{Si,Nb})\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH,Cl,H}_2\text{O})_5$	10
Euxenite	$(\text{Ln,Ca,U,Th})(\text{Nb,Ta,Ti})_2\text{O}_6$	<40§
Fergusonite	$\text{Ln}(\text{Nb,Ti})\text{O}_4$	47
Florencite	$\text{LnAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	32§
Gadolinite	$\text{LnFeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	52
Huanghoite	$\text{BaLn}(\text{CO}_3)_2\text{F}$	38
Hydroxylbastnasite	$\text{LnCO}_3(\text{OH,F})$	75
Kainosite	$\text{Ca}_2(\text{Y,Ln})_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{CO}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$	38
Loparite	$(\text{Ln,Na,Ca})(\text{Ti,Nb})\text{O}_3$	36
Monazite	$(\text{Ln,Th})\text{PO}_4$	71
Mosandrite	$(\text{Ca,Na,Ln})_{12}(\text{Ti,Zr})_2\text{Si}_7\text{O}_{31}\text{H}_6\text{F}_4$	<65§
Parisite	$\text{CaLn}_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$	64
Samarskite	$(\text{Ln,U,Fe})_3(\text{Nb,Ta,Ti})_5\text{O}_{16}$	12
Synchisite	$\text{CaLn}(\text{CO}_3)_2\text{F}$	51
Thalenite	$\text{Y}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$	63§
Xenotime	YPO_4	61§
Yttrotantalite	$(\text{Y,U,Fe})(\text{Ta,Nb})\text{O}_4$	<24§

* Formulas del mineral: Mandarin 1999, Ln= Elementos lantánidos

† Contenidos de Óxidos de tierras raras: Frondel, 1958; Overstreet, 1967; Anon, 1980; Kapustin, 1980; Mazzi y Munno 1983; Mariano 1989.

‡ Cuando más de un análisis está disponible, se ha tomado el análisis con mayor contenido de óxidos de REE (por ejemplo, en los óxidos de REE para la monacita en Mountain Pass se reportó la carbonatita; la monacita de pegmatitas y en rocas metamórficas, generalmente tiene menor concentración en los óxidos de REE).

§Cálculo estequiométrico del contenido de óxidos de REE.

La monacita comercial contiene entre 55 a 60 % óxidos de REE, 3-10% de torio, algo de itrio y pequeñas cantidades de uranio. Tiene un alto peso específico y es resistente a la erosión y transporte, por lo que la encontramos también en depósitos de placeres. Usualmente, este mineral se encuentra asociado a ilmenita, zircón y rutilo. Este mineral es el más común que contiene tierra raras en depósitos de placeres. Normalmente, es producida como un subproducto de minerales pesados (Neary et al, 1984).

Bastnesita presenta altos contenidos de REE, pero escasa o ausente concentración de torio e itrio. Ambos minerales contienen predominantemente tierras raras livianas. Xenotimo ((Y, REE) PO₄) tiene una producción mundial menor que los anteriores, pero es una fuente importante de itrio y HREE. Además las tierras raras las podemos encontrar en branerita, euxenita y apatito. La Tabla 3.2 presenta el porcentaje de elementos de REE en monacita, bastnacita, xenotimo y apatito.

Apatito puede contener REE de interés económico. Este mineral está asociado con rocas ígneas alcalinas, siendo su recuperación altamente comercial. Junto al pirocloro (Na, Ca, Ce)₂Nb₂O₆F) pueden presentar minerales de tierras raras como sustitución en algunos elementos dentro del mineral, conservando el equilibrio químico.

El potencial económico que tendrán las REE para su extracción dependerá fuertemente de su mineralogía. En el pasado, los depósitos que se explotaban se limitaban a minerales que contienen REE, que eran relativamente fáciles de concentrar a causa de tamaño de grano grueso u otros atributos. Por ejemplo, minerales que se descomponen fácilmente, tales como el carbonato bastnasita, son más deseables que aquellos que son difíciles de disociar, tales como el silicato allanita.

Tabla 3.2. Porcentaje máximo de elementos de REE en óxidos de tierras raras (REEO) de monacita, bastnasita, xenotimo y apatito (Neary, C.R., Highley, D.E., 1984).

Óxidos de tierras raras		Minerales			
		Monacita REEO(%) (REE, Th, Y) PO ₄	Bastnasita REEO(%) REE(CO ₃)F	Xenotimo REEO(%) (Y, REE)PO ₄	Apatito REEO(%) (Ca, REE) S [(P,Si)O ₄] ₃ (O,F)
Lantano	La ₂ O ₃	23.7	33.2	0.5	25.1
Cerio	CeO ₂	45.6	49.1	5	45
Praseodimio	Pr ₆ O ₁₁	5	4.3	0.7	3.9
Neodimio	Nd ₂ O ₃	17.2	12	2.2	14
Samario	Sm ₂ O ₃	2.5	0.78	1.9	1.6
Europio	Eu ₂ O ₃	0.05	0.11	0.2	0.5
Total de LREE		94.05	99.49	10.5	90.1
Gadolinio	Gd ₂ O ₃	1.5	0.17	4	1.5
Terbio	Tb ₄ O ₇	0.04	0.16	1	0.1
Disprosio	Dy ₂ O ₃	0.68	0.031	8.7	1
Holmio	Ho ₂ O ₃	0.05	0.005	2.1	0.1
Erbio	Er ₂ O ₃	0.21	0.0035	5.4	0.15
Tulio	Tm ₂ O ₃	0.02	0.0008	0.9	0.02
Yterbio	YbO ₃	0.12	0.0013	6.2	0.08
Lutecio	Lu ₂ O ₃	0.04	0.0001	0.4	
Itrio	Y ₂ O ₃	2.4	0.09	60.8	4.3
Total de HREE		5.06	0.318	89.5	7.25
Total de REEO en el mineral		55-60%	60-70%	42-51%	<1%

3.4 Procesamiento

La importancia de las tierras raras en la industria moderna ha llevado a la implementación de una serie de procesos para la obtención por separado de cada uno de estos elementos con un elevado grado de pureza. Estos procesos se han desarrollado para los minerales que contienen tierras raras, como la monacita, astaensita, xenotimo y euxenita, como también para las tierras raras como productos secundarios.

Estas técnicas utilizan recristalizaciones múltiples y fraccionadas, operaciones que necesitaban la recirculación de muchas corrientes hasta obtener productos con una pureza adecuada.

Actualmente, existen variados métodos de extracción de tierras raras, tales como cromatografía, separación fotoquímica, cambio de ión, extracción supercrítica, extracción con disolventes, precipitación, entre otros. Una de las primeras plantas construidas para el beneficio de tierras raras es la de Yao Lung en China (Alguacil, 1997).

3.5 Aplicaciones

Las aplicaciones de las REE dentro de las nuevas tecnologías juegan un rol sustancial, junto con cumplir un papel estratégico para el desarrollo de los países que poseen estos recursos, puesto que constituyen materiales imprescindibles e insustituibles en la industria actual. Los usos diversos que se le dan a estos metales críticos, se deben a sus excepcionales propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas.

Sus usos y aplicaciones en la industria son variados, entre productos químicos, electrónica, cerámicas, vidrios, iluminación, imanes y técnicas médicas. Esta clase de materiales son vitales para la fabricación de una serie de productos de alta tecnología, que incluyen teléfonos móviles, computadoras, así como tecnologías verdes como los vehículos híbridos o las turbinas de viento. La demanda de estos elementos ha aumentado rápidamente dado los usos que tiene y su versatilidad. Actualmente, estos elementos son considerados como estratégicos para el desarrollo de las sociedades modernas (De la Hoz, 2012).

3.6 Producción y mercado

La primera explotación comenzó en el siglo XIX, que proporcionó un dramático cambio en las aplicaciones industriales. El interés por las tierras raras se originó en 1883 con el desarrollo del gas incandescente que contiene tierras raras y óxidos de zirconio. Hasta el siglo XX, el interés comercial por las tierras raras fue únicamente por el mineral monacita, que contiene importantes concentraciones de tierras raras, pero además es una gran fuente de torio.

Las REE fueron extraídas originalmente en reducidas cantidades provenientes de pequeños depósitos de pegmatita granítica, siendo este ambiente geológico en el que se descubrió por primera vez. Durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, las tierras

raras provenían principalmente de depósitos de placer, en particular del sudeste de Estados Unidos. Con la excepción de los elementos más abundantes de los lantánidos (cerio, lantano y neodimio), las tierras raras no estaban disponibles comercialmente hasta la década de 1940. Entre 1965 y 1985, la mayor parte de REE en el mundo provenía de Mountain Pass, California, EE.UU. Australia, hasta la década noventa lideraba con depósitos de placer de minerales pesados con tierras raras como subproductos. Recientemente, Rusia también es un importante productor de REE. Durante la década de 1980, China emergió como un importante productor de materias primas de REE, mientras que las producciones de Australia y Estados Unidos disminuyeron drásticamente (Figura 3.3). Desde 1998, más del 80% de REE en el mundo provienen de China, y la mayor parte de esta producción es del depósito de REE-Fe-Nb de Bayan Obo, en la región autónoma de Mongolia interior en China. (El Anexo C presenta los tipos de depósito de REE en el mundo y su tamaño).

Si bien las tierras raras se encuentran en muchas partes, el dilema es encontrar reservas que puedan ser explotadas de manera rentable. Estos minerales los encontramos en distintos países, pero la mayoría de las minas en el mundo han cerrado en los últimos 25 años cuando el gigante asiático comenzó a producir a un costo mucho más bajo. De hecho, en los años 60, Estados Unidos era el principal abastecedor y otros países como India también fueron productores importantes.

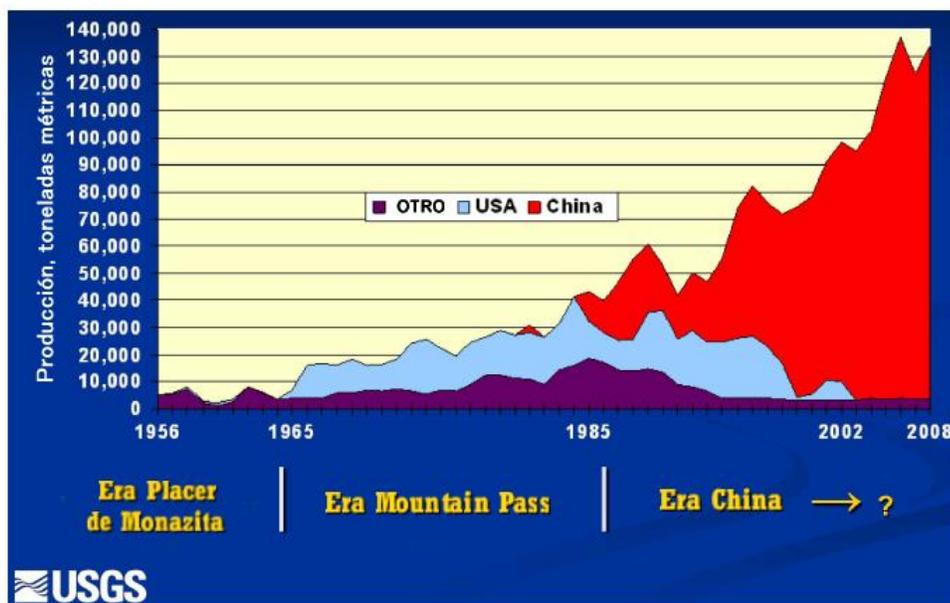


Figura 3.3. Producción total de óxidos de tierras raras (U.S. Geological Survey, 2011).

En el anexo D se aprecian las últimas cifras anuales de producción de los principales países dentro de mercado de REE.

Las mayores reservas se reconocen en China, Brazil, Australia, India, Estados Unidos y Malasia. Sin embargo, en el año 2014 las mayores producciones fueron de China (86%), Estados Unidos (6%), India (2%), Australia (2%) (Geological Survey, 2015).

Científicos chinos descubrieron el más grande yacimiento de tierras raras, Bayan Obo, en el año 1927, comenzado la producción de tierras raras en 1957. Después de 8 décadas de exploración, los recursos de tierras raras han sido descubiertos en 21 provincias de China. China domina el mercado de tierras raras, teniendo la más alta producción mundial, además de contar con grandes reservas (Geological Survey, 2015).

En 1990, China declaró este tipo de elementos como recursos estratégicos, limitando sus exportaciones y desarrollando comisiones estatales que controlan el mercado, teniendo exportaciones en “cuotas”. Actualmente, donde existe una explotación de REE, la provincia de dicho lugar es la responsable de dirigir las exportaciones en cuotas. Además, se ha creado un impuesto por importaciones y exportaciones de estos elementos. Dado esto, existe un déficit de estos elementos en el mercado tecnológico, y sus precios han aumentado considerablemente. La dependencia del resto del mundo quedó clara a fines de 2010 cuando China amenazó con restringir los suministros, y el alza en los precios de algunas tierras raras llegó a ser del 3.000%. Desde entonces los precios han caído, pero el choque fue suficiente para impulsar a las empresas a comenzar a explorar, explotar y refinar las tierras raras en otras partes del mundo.

3.7 Exploración y explotación en el mundo

Actualmente existen diversos proyectos en exploración y explotación de tierras raras.

Los depósitos de REE se presentan en todo el mundo, en todos los continentes, en diferentes tipos de depósitos: Depósitos de Carbonatita, depósitos de hierro-REE, depósitos de placer, depósito de Adsorción por ión, depósitos asociados a complejos alcalinos, depósitos en vetas de fosfatos, y depósitos asociados con uranio (Figura 3.4). Hay muchos sitios en el mundo donde se encuentran disponibles las tierras raras, pero son muy pocos en los que se encuentran como depósitos comercialmente rentables.

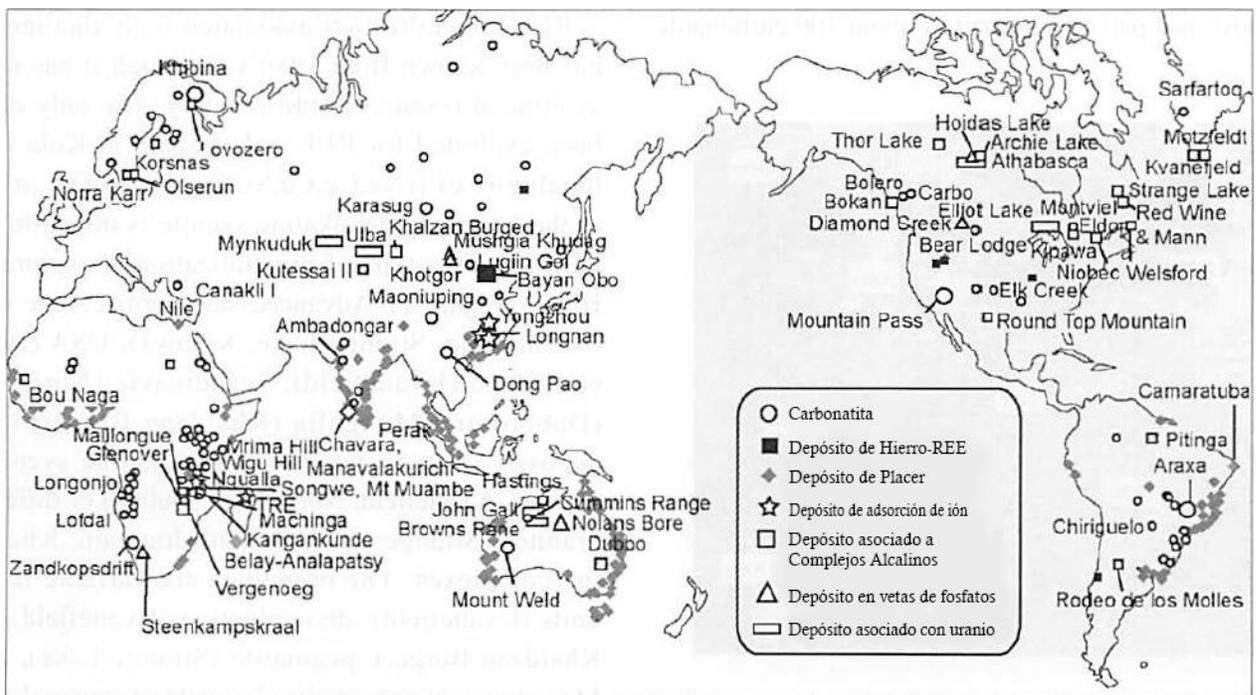


Figura 3.4. Distribución de la exploración y explotación de proyectos de REE en el mundo (Watanabe, 2014).

Las tablas 3.3 y 3.4 presentan las concentraciones de tierras raras en ppm de los principales proyectos en exploración y explotación de REE.

Tabla 3.3. Proyectos de exploración y explotación de tierras raras (Continuación pág. 43). Fuente: www.techmetalsresearch.com

Proyectos de exploración y explotación	Tipo de depósito	País	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Aksu Diamas		Turquía	153,48	252,37	24,83	85,74	8,62	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Araxá	Carbonatita Laterita	Brasil	10061,62	16924,91	1580,91	4998,36	543,31	120,91	251,60	25,51	104,56	17,46	26,24	0,00	17,56	0,00
Ashram Main		Canadá	4220,77	7196,55	753,21	2692,08	336,33	77,72	182,19	17,00	69,71	8,73	17,49	0,00	8,78	0,00
Ashram MHREO		Canadá	2992,91	5714,90	662,16	2572,05	405,32	103,63	268,95	34,01	130,70	17,46	34,98	8,76	26,35	0,00
Bear Lodge	Hierro-REE	EE.UU.	6019,92	9475,99	1092,56	4158,15	681,29	155,45	364,39	34,01	95,84	8,73	17,49	0,00	8,78	0,00
Bokan	Complejos alcalinos	EE.UU.	596,88	1383,95	165,54	711,60	189,73	17,27	190,87	34,01	217,83	43,65	113,69	17,51	87,82	8,79
Brockmans		Australia	25,58	105,83	16,55	60,01	43,12	0,00	60,73	17,00	165,55	34,92	148,67	17,51	122,95	17,59
Browns Range	Placer	Australia	136,43	309,35	41,39	205,76	112,11	25,91	294,98	68,02	461,80	96,03	288,59	43,78	237,11	35,18
Buckton		Canadá	42,63	65,13	8,28	34,29	8,62	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Buckton South		Canadá	42,63	73,27	8,28	34,29	8,62	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Charley Creek (JV)		Australia	42,63	89,55	8,28	34,29	8,62	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Clay-Howells		Australia	1560,40	2588,80	264,86	943,09	146,61	34,54	95,43	34,01	60,99	8,73	26,24	0,00	26,35	0,00
Cummins Range	Carbonatita	Canadá	3990,54	6626,68	695,27	2340,57	284,59	51,82	173,52	0,00	78,42	0,00	8,75	0,00	0,00	0,00
Dubbo Zirconia Project	Complejos alcalinos	Australia	1483,66	2670,21	297,97	1080,26	163,85	8,64	164,84	25,51	156,84	26,19	87,45	8,76	79,04	8,79
Eco Ridge		Canadá	315,49	578,00	57,94	197,19	34,50	0,00	26,03	0,00	17,43	0,00	8,75	0,00	8,78	0,00
Elliott Lake Teasdale	Depósito asociado con Uranio	Canadá	409,29	716,40	74,49	240,06	43,12	0,00	26,03	0,00	17,43	0,00	8,75	0,00	8,78	0,00
Foxtrot		Canadá	1560,40	3174,95	364,19	1371,76	250,09	8,64	199,55	34,01	182,98	34,92	104,94	17,51	87,82	17,59
Glenover (JV)	Vetas de fosfatos	Sudáfrica	3061,12	7782,69	1009,79	4055,27	646,79	164,09	373,06	34,01	139,41	17,46	34,98	0,00	17,56	0,00
Grande-Vallée		Canadá	76,74	154,68	16,55	77,16	17,25	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	8,75	0,00	8,78	0,00
Hoidas Lake	Depósito asociado con Uranio	Canadá	4186,66	9117,80	1183,61	4235,32	560,55	112,27	260,28	25,51	69,71	0,00	52,47	0,00	8,78	0,00
Kangankunde		Malawi	10760,82	17169,13	1647,12	5092,67	388,08	69,09	130,14	25,51	26,14	0,00	8,75	0,00	0,00	0,00
Kipawa		Canadá	486,03	944,34	115,88	454,40	103,49	8,64	104,11	17,00	121,98	26,19	87,45	8,76	87,82	8,79
Kutessay II	Complejos alcalinos	Kirguistán	375,18	423,33	82,77	188,62	94,86	8,64	78,08	34,01	139,41	8,73	78,71	8,76	79,04	8,79
Kvanebjerg	Complejos alcalinos	Groenlandia	2566,57	3744,81	380,74	1208,87	155,23	8,64	104,11	17,00	104,56	17,46	61,22	8,76	43,91	17,59
La Paz		EE.UU.	68,21	138,40	16,55	60,01	8,62	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lavergne-Springer		Canadá	2651,83	4363,52	455,24	1586,10	189,73	43,18	104,11	8,50	43,57	8,00	17,49	0,00	8,78	0,00
Lofdal	Vetas de fosfatos	Namibia	179,06	317,49	33,11	137,18	60,37	51,82	225,57	59,51	418,23	96,03	271,10	43,78	254,68	35,18
Milo		Australia	127,90	211,66	16,55	68,59	8,62	0,00	8,68	0,00	8,71	0,00	8,75	0,00	8,78	0,00

Tabla 3.4. Proyectos de exploración y explotación de tierras raras.Fuente: www.techmetalsresearch.com

Proyectos de exploración y explotación	Tipo de depósito	País	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Montviel		Canadá	3180,50	5780,03	637,33	2083,36	215,60	43,18	69,41	8,50	17,43	0,00	8,75	0,00	0,00	0,00
Mount Weld CLD	Carbonatita	Australia	19807,76	37651,61	4155,06	15123,68	2043,86	449,08	919,65	76,52	209,12	26,19	52,47	8,76	26,35	0,00
Mount Weld Duncan	Carbonatita	Australia	10249,21	15500,25	1903,71	7416,09	1181,47	319,54	832,89	110,53	531,50	78,57	174,90	17,51	79,04	8,79
Mountain Pass	Carbonatita	EE.UU.	18588,42	26246,23	2334,12	6755,93	457,07	60,45	112,79	34,01	26,14	8,73	8,75	8,76	8,78	8,79
Mrima Hill High Grade	Carbonatita	Kenia	18102,40	24837,85	2607,26	8650,67	1103,86	293,63	720,10	85,02	392,09	61,11	148,67	17,51	96,60	17,59
Mrima Hill Main	Carbonatita	Kenia	6744,70	11177,44	1191,89	4226,74	612,30	172,72	459,82	59,51	287,53	52,38	131,18	17,51	87,82	8,79
Nechalacho Basal		Canadá	1978,22	4233,26	546,28	2220,54	474,31	60,45	425,12	59,51	322,39	61,11	139,92	17,51	114,17	17,59
Nechalacho Upper		Canadá	2072,01	4607,74	562,84	2280,55	422,57	43,18	312,33	34,01	130,70	17,46	43,73	8,76	35,13	8,79
Ngualla	Carbonatita	Tanzania	9686,45	16452,74	1671,96	5855,71	603,67	129,54	277,63	25,51	60,99	8,73	26,24	0,00	8,78	0,00
Niobec	Complejos alcalinos	Canadá	3623,89	6756,94	761,48	2752,10	310,46	60,45	147,49	8,50	43,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nolans	Vetas de fosfatos	Australia	4271,93	10395,91	1282,94	4621,12	517,43	86,36	225,57	17,00	69,71	8,73	17,49	0,00	8,78	0,00
Norra Kärr	Complejos alcalinos	Suecia	486,03	1042,03	140,71	574,43	155,23	17,27	173,52	34,01	235,26	52,38	157,41	26,27	149,29	17,59
Olserum	Complejos alcalinos	Suecia	707,72	1538,63	190,37	771,62	181,10	8,64	182,19	34,01	182,98	34,92	104,94	17,51	96,60	17,59
Round Top	Complejos alcalinos	EE.UU.	17,05	73,27	8,28	25,72	8,62	0,00	8,68	0,00	34,85	8,73	34,98	8,76	52,69	8,79
Sarfartoq	Carbonatita	Groenlandia	3163,44	6976,74	819,42	2769,24	275,96	60,45	147,49	8,50	26,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Serra Verde		Brasil	298,44	439,61	57,94	180,04	34,50	0,00	26,03	8,50	34,85	8,73	17,49	0,00	17,56	0,00
Songwe Hill	Adsorción de ión	Malawi	3103,76	5364,85	587,67	2074,79	301,84	69,09	173,52	17,00	104,56	17,46	34,98	8,76	26,35	0,00
Sørensen		Groenlandia	2609,20	3883,20	364,19	1105,98	137,98	8,64	104,11	17,00	95,84	17,46	52,47	8,76	43,91	8,79
Steenkampskraal	Vetas de fosfatos	Sudáfrica	24787,41	51613,23	5934,61	21579,53	3466,81	77,72	2377,20	255,06	1219,85	174,59	358,55	35,02	158,08	17,59
Storkwitz		Alemania	1057,32	1791,00	190,37	548,70	51,74	8,64	43,38	8,50	8,71	0,00	8,75	0,00	8,78	0,00
Strange Lake Enriched	Complejos alcalinos	Canadá	1279,02	2930,72	322,80	1200,29	310,46	17,27	338,36	76,52	575,07	130,95	428,52	70,05	447,88	61,56
Strange Lake Granite	Complejos alcalinos	Canadá	1023,22	2198,04	248,31	943,09	206,97	8,64	199,55	42,51	261,40	61,11	183,65	26,27	184,42	26,38
TANBREEZ		Groenlandia	989,11	1766,57	173,82	685,88	129,36	17,27	147,49	25,51	165,55	34,92	139,92	17,51	114,17	17,59
Tantalus		Madagascar	144,96	252,37	33,11	111,46	17,25	0,00	17,35	0,00	17,43	0,00	8,75	0,00	8,78	0,00
Two Tom		Canadá	2455,72	4428,64	463,51	1611,82	275,96	25,91	164,84	17,00	69,71	8,73	17,49	0,00	8,78	0,00
Wigu Hill Twiga	Carbonatita	Tanzania	17224,14	20840,68	1572,63	3858,08	224,22	51,82	69,41	8,50	17,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xiluvo		Mozambique	3751,79	7652,44	827,70	3000,73	431,19	86,36	260,28	0,00	174,26	0,00	87,45	0,00	0,00	0,00
Yangibana (JV)		Australia	2660,36	5934,71	761,48	2649,22	319,08	69,09	164,84	8,50	34,85	0,00	8,75	0,00	0,00	0,00
Zandkopsdrift (JV)	Carbonatita	Sudafricá	4237,82	6805,78	728,38	2546,33	353,58	95,00	216,90	25,51	113,27	17,46	43,73	8,76	26,35	0,00
Zone 3		Groenlandia	2805,32	4054,16	389,02	1123,13	137,98	8,64	95,43	17,00	95,84	17,46	52,47	8,76	52,69	8,79

4 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

4.1 Selección de las muestras

Desde los inicios de la mina, se han realizado campañas de sondajes para conocer principalmente las concentraciones de Cu, As, Sb, Mo, Ni, Zn, S, Pb y Fe.

Actualmente, el área de Geometalurgia de El Teniente realiza en forma rutinaria análisis químicos de elementos mayores y elementos menores, siendo las tierras raras incluidas dentro de estos últimos. Los análisis químicos de la unidad geometalúrgica de Teniente se han realizado en el laboratorio Actlabs, Activation Laboratories Ltd., Canadá.

El muestreo lo han realizado geólogos del yacimiento El Teniente, desplegando en un software el modelamiento de los sondajes, las muestras ensayadas, la litología, la zona geotécnica, y eventualmente las leyes de cobre u otro tema de apoyo. Las muestras son monolíticas, y están contenidas en sólo una zona geotécnica, y la ley media de cobre en la muestra es mayor o igual a la ley de corte vigente al momento del muestreo. En el momento del muestreo se evitaron los elementos discretos, tales como contactos litológicos y de zona geotécnica, y estructuras (fallas, diques, etc.) (referencia interna GMRD, 2015).

Muchos elementos de tierras raras se presentan en minerales como óxidos y silicatos, que son especialmente resistentes a la digestión con ácido, por lo que generalmente se prefiere la fusión como método de descomposición. La técnica analítica utilizada para los elementos corresponde a la espectrometría de emisión óptica por plasma con acoplamiento inductivo (ICP-OES) en un muestreo de roca total (Anexo E muestra los límites de detección). Este método es una técnica multielemental, que tiene por objeto medir la radiación procedente de los niveles electrónicos de los átomos, después de que estos sean irradiados o excitados por una fuente de energía. La radiación de los átomos se emite en forma de luz (fotones), con longitudes de onda específicas para cada elemento.

Este trabajo se focaliza principalmente en 14 tierras raras, Lantano, Cerio, Praseodimio Neodimio, Samario, Europio, Gadolinio, Terbio, Disproso, Holmio, Erblio, Tulio, Yterbio y Lutecio. El elemento Prometio no se incluye en la lista ya que se genera únicamente de forma artificial en reactores nucleares. No se han considerado el Ytrio y Escandio dado el reducido número de datos geoquímicos existentes para estos elementos.

Se clasificaron las muestras de acuerdo a sus características geológicas. Se realiza control de calidad de las unidades litológicas correspondientes a cada muestra analizada, a partir de la base de datos en la plataforma *XILAB MAP* de la Superintendencia de Geología.

Se han agrupado las muestras de sondaje que presentan la misma litología en cada tramo, siendo las siguientes: Complejo de Brechas Braden (CBB), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Brechas de cuarzo y anhidrita (BXANH_BXQZ), Pórfido Dacítico (PDA), Pórfido

Diorítico (PDI) y Tonalita (TO), siendo CMET la unidad con mayor cantidad de datos químicos (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

Tabla 4.1. Total de muestras de sondajes con análisis químicos en las 14 tierras raras en estudio para cada litología.

Litología	Muestras con REE
CMET	280
CBB	43
PDA	37
PDI	21
TO	13
BXANH_BXQZ	11
N° Total de Sondajes con REE	405

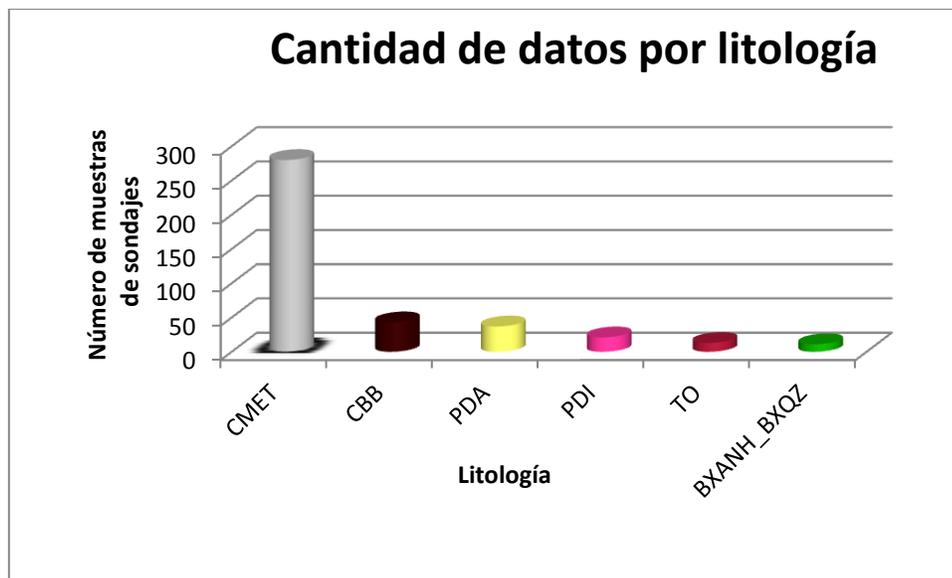


Figura 4.1. Cantidad de datos por litología con REE.

Complejo Máfico El Teniente (CMET): CMET se clasifica según su textura y el tamaño de plagioclasas en Gabros, Diabasas y Pórfidos basálticos. Se considera el grupo CMET dado que la alteración no permite conocer cada tipo de roca.

Complejo de Brechas Braden (CBB): Los cuerpos de brechas están constituidos por brechas ígneas o de contacto y brechas hidrotermales. Las brechas ígneas son descartadas por la heterogeneidad de sus clastos. Se considera como Complejo de Brechas Braden a todas aquellas

brechas pertenecientes a la diatrema freatomagmática del centro del yacimiento y a sus brechas hidrotermales de borde. Sus proporciones minerales son variables y corresponden a turmalina, sericita y clorita.

Pórfido Dacítico (PDA): Intrusivo tabular con diferentes tipos de textura.

Pórfido Diorítico (PDI): Corresponden a 3 cuerpos que se han cristalizado de forma sincrónica.

Tonalita (TO): Se presenta como un gran intrusivo dentro del CMET, presentando distintos tipos de texturas.

Brechas de Anhidrita y de Cuarzo (BXANH_BXQZ): La Brecha hidrotermal de anhidrita y cuarzo son el producto del hidrofracturamiento, es decir, al encontrarse fracturada la roca, los fluidos aprovecharon sus espacios generando estructuras craqueladas donde se depositó el cuarzo y la anhidrita. Estas brechas no presentan alteración, tiene una matriz de cuarzo y anhidrita, y sus clastos son monolíticos correspondientes al CMET, PDA o PDI. Estas dos brechas se encuentran espacialmente una al lado de la otra y tienen una difícil distinción.

Se han eliminado las muestras de brechas ígneas, talus, material de cavidad, ferrocreta y análisis puntuales como los de clastos en brechas, ya que no caracteriza la brecha, sino el clasto, siendo no representativo.

Finalmente, se cuenta con un total de 5670 datos georreferenciados de los 14 elementos pertenecientes al grupo de las tierras raras en 405 muestras de sondajes.

La mayor cantidad de sondajes realizados contienen análisis químicos de REE que se ubican en la parte oeste de la Brecha Braden, según las coordenadas locales, entre las cotas 500 Norte a 500 Sur y 100 Oeste a 400 este, entre 1600 a 2600 m.s.n.m., en distintas direcciones. Otro número importante de estos se encuentra hacia el sector noroeste de la Brecha Braden, correspondientes a la unidad litológica Pórfido Dacítico. Estos sondajes no presentan una inclinación preferencial (Figura 5.1).

5 RESULTADOS

La zona de estudio se desarrolla en el yacimiento El Teniente, entre las siguientes coordenada mina: 2200N a 1000S y 200W a 2000E (Figura 5.1).

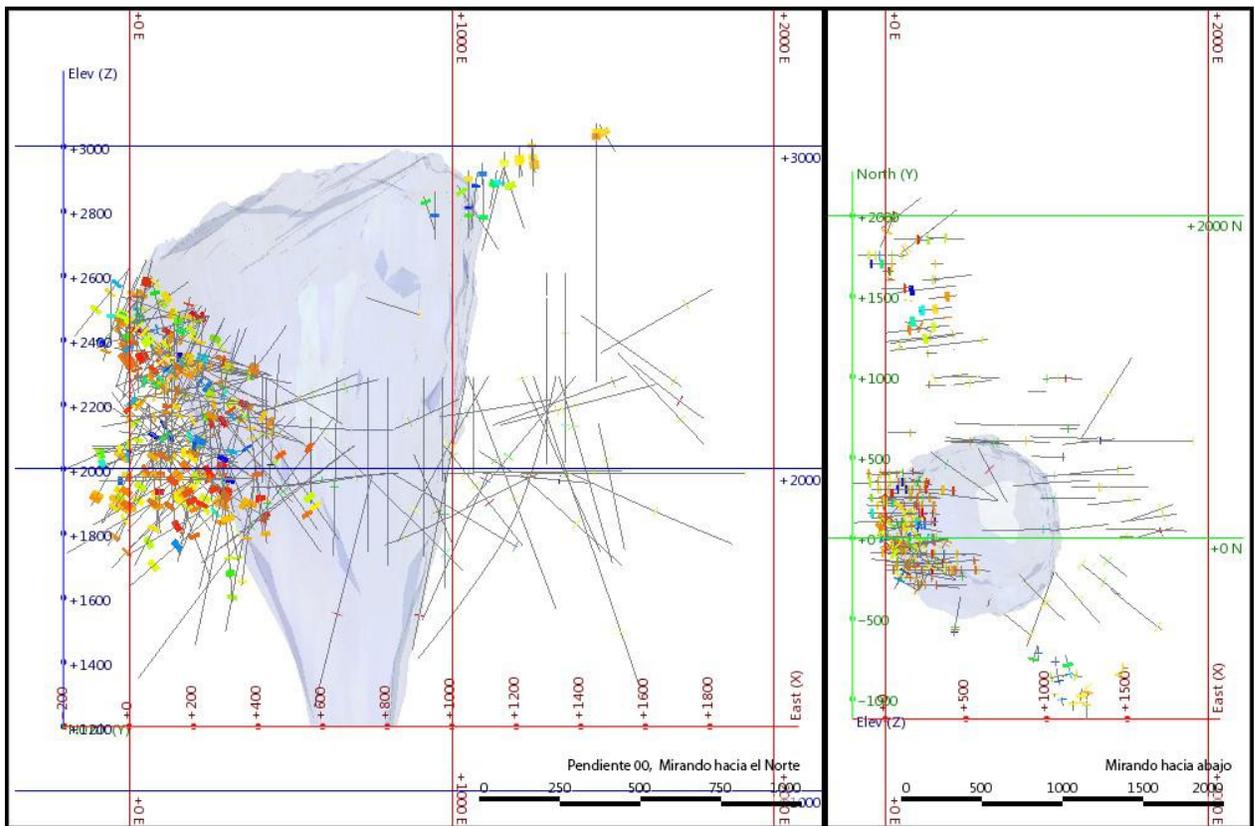


Figura 5.1. Isométrico con distribución espacial de la totalidad de los datos geoquímicos. La masa celeste corresponde a la Brecha Braden; Las líneas grises son los sondajes realizados que presentan datos químicos de REE; color azul, celeste, verde, amarillo, naranja, rojo y café representan el contenido de REE en la escala 0-100%, siendo el azul el valor más bajo y el rojo el más alto.

5.1 Análisis de datos

Con el fin de describir apropiadamente las diversas características geoquímicas se ha realizado la estadística descriptiva por litología de las REE como también del promedio de estas (Tabla 5.1 y 5.2; Anexo F).

Dentro de todas las litologías, los máximos se presentan en las tierras raras livianas, principalmente en el elemento cerio. Los mínimos los encontramos en las tierras raras pesadas, siendo el lutecio el que presenta los valores más bajos.

CMET presenta un máximo de 77,4 ppm. Se tiene un promedio entre 10 y 30 ppm en La, Ce y Nd, mientras que los otros elementos tienen concentraciones inferiores a 4 ppm.

En CBB se presenta nuevamente el cerio como el elemento que presenta mayores concentraciones con 32,48 ppm. La y Nd presentan en promedio 16 ppm. El resto de los elementos tienen concentraciones menores a 4 ppm.

PDI presenta cerio con 23,37 ppm. La y Nd presentan 11 ppm en promedio. El resto de las concentraciones son menores a 3 ppm.

PDA y TO presentan ambos promedios de Ce con 30 ppm. La y Nd con 14,5 ppm en promedio. Los elementos restantes tienen concentraciones menores a 4 ppm.

Las Brechas de Anhidrita y Cuarzo muestran la mayor concentración promedio en el elemento Cerio, con 43,45 ppm. Lantano y neodimio contienen en promedio 22 ppm. Los elementos restantes tienen concentraciones menores a 6 ppm. Esta litología es la que presenta las mayores desviaciones estándar en las LREE.

Dentro de las HREE los elementos en todas las litologías presentan concentraciones menores a 1 ppm, salvo gadolinio y disprosio con concentraciones promedios de 3 ppm (en CMET, CBB y Brechas), y 1,5 ppm (en PDI, PDA y TO).

Tabla 5.1. Análisis estadísticos de CMET, BXANH_BXQZ y CBB. Se presenta la media, la desviación estándar, el mínimo y máximo. Concentraciones en ppm.

REE	CMET				BXANH_BXQZ				CBB			
	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>La</i>	12,46	3,97	4,2	39	20,92	16,59	9,1	62,3	15,91	5,61	10,3	39,1
<i>Ce</i>	27,33	7,84	3,77	77,4	43,45	37,73	19,3	148	32,48	10,21	20,9	77,2
<i>Pr</i>	3,65	0,93	1,35	9,22	5,68	5,44	2,33	21,52	3,98	1,18	2,56	9,22
<i>Nd</i>	15,96	3,63	1,62	33,5	23,33	22,38	8,8	89,2	16,07	4,32	10,3	33,5
<i>Sm</i>	3,67	0,7	1,51	6,58	4,8	4,03	1,8	16,7	3,16	0,82	1,91	6,53
<i>Eu</i>	1,03	0,17	0,44	1,8	1,05	0,35	0,48	1,94	0,84	0,21	0,52	1,4
<i>Gd</i>	3,58	0,65	1,25	6,26	3,07	0,91	1,22	4,29	2,73	0,63	1,77	4,77
<i>Tb</i>	0,54	0,1	0,22	1	0,59	0,32	0,23	1,48	0,37	0,08	0,25	0,6
<i>Dy</i>	3,15	0,58	1,04	5,8	3,09	1,13	1,25	6,05	2,08	0,48	1,35	3,35
<i>Ho</i>	0,64	0,12	0,16	1,2	0,6	0,18	0,25	1,03	0,42	0,09	0,26	0,63
<i>Er</i>	1,8	0,34	0,42	3,4	1,63	0,4	0,66	2,3	1,18	0,27	0,79	1,76
<i>Tm</i>	0,26	0,05	0,08	0,48	0,23	0,05	0,09	0,27	0,18	0,04	0,11	0,29
<i>Yb</i>	1,67	0,34	0,36	3,13	1,45	0,36	0,54	1,86	1,14	0,24	0,74	1,72
<i>Lu</i>	0,26	0,06	0,06	0,48	0,21	0,05	0,09	0,28	0,18	0,04	0,12	0,27

Tabla 5.2. Análisis estadísticos de PDI, PDA y TO. Se presenta la media, la desviación estándar, el mínimo y máximo. Concentraciones en ppm.

REE	PDI				PDA				TO			
	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>La</i>	11,56	3,06	6,18	16,84	15,86	7,38	8,2	52,9	15,13	1,22	12,55	16,7
<i>Ce</i>	23,37	6,82	10,6	35,49	30,06	10,99	16,4	84	30,01	2,96	24,14	34,1
<i>Pr</i>	2,83	0,85	1,24	4,46	3,53	1	1,98	8,01	3,68	0,4	2,91	4,25
<i>Nd</i>	10,36	3,17	4,72	17,17	13,31	3,33	7,6	26	13,9	1,55	11,08	16,5
<i>Sm</i>	1,9	0,65	0,98	3,35	2,15	0,44	1,36	2,97	2,55	0,35	1,92	3,11
<i>Eu</i>	0,57	0,18	0,18	0,92	0,56	0,14	0,23	0,98	0,68	0,11	0,47	0,86
<i>Gd</i>	1,36	0,54	0,6	2,62	1,45	0,33	0,79	2,14	1,69	0,28	1,4	2,39
<i>Tb</i>	0,17	0,09	0,05	0,33	0,17	0,05	0,05	0,29	0,21	0,04	0,16	0,29
<i>Dy</i>	0,88	0,36	0,4	1,75	0,83	0,23	0,4	1,58	1,02	0,22	0,7	1,44
<i>Ho</i>	0,16	0,07	0,05	0,31	0,14	0,06	0,05	0,3	0,18	0,05	0,1	0,26
<i>Er</i>	0,46	0,18	0,2	0,87	0,41	0,13	0,2	0,79	0,49	0,13	0,3	0,78
<i>Tm</i>	0,06	0,03	0,03	0,12	0,06	0,02	0,03	0,11	0,07	0,02	0,03	0,11
<i>Yb</i>	0,45	0,17	0,19	0,81	0,4	0,12	0,16	0,74	0,44	0,11	0,23	0,64
<i>Lu</i>	0,07	0,03	0,03	0,12	0,06	0,02	0,02	0,12	0,06	0,02	0,03	0,09

La figura 5.2 muestra las concentraciones de tierras raras de los proyectos de exploración y explotación en el mundo, junto a los yacimientos de cobre de nuestro país, y las concentraciones de la corteza oceánica y continental.

Araxá corresponde a un proyecto en Brasil de REE presentes en Carbonatitas-Lateritas; con 1,6% de tierras raras en óxidos (Anexo C); Montain Pass, es un yacimiento en explotación en EE.UU., con 1,8 % de tierras raras en óxidos presentes en Carbonatitas (Anexo C); Bear Lodge es un yacimiento situado en EE.UU, corresponde a un depósito de Hierro- REE. Brons Range en Australia, es un depósito de Carbonatitas; Songwe Hill, ubicado en Malawi, es un depósito de Adsorción de ión; Kutessay II, en Kirguistán, es un depósito de Complejos alcalinos; Nolans en Australia, corresponde a un depósito de REE en vetas de fosfatos; Hoidas Lake, en Canadá, corresponde a un proyecto de REE asociado a un depósito de Uranio. Se han graficado también las concentraciones del promedio de tierras raras en el yacimiento El Teniente y Pelambres, ambos pórfidos cupríferos chilenos; las concentraciones de tierras raras en la corteza oceánica (White y Klein, 2013) y la corteza continental (Taylor y McLennan ,1985).

La corteza oceánica es la que presenta los valores más bajos en LREE, inferior a la decena de ppm. Pelambres y El Teniente presenta valores similares en LREE, en el orden de las decenas, siendo inferiores a las concentraciones de la corteza continental. Se tiene que el depósito de placer Browns Range y el depósito asociado a complejos alcalinos Kutessay II superan la centena de ppm en las LREE, mientras que en el resto de los proyectos las concentraciones de LREE superan las unidades de mil, con Araxá y Mountain Pass por sobre las decenas de mil.

Pelambres presenta las menores concentraciones, inferiores a la decena de ppm, en las HREE, seguidas de El Teniente, la corteza oceánica y continental. Los proyectos de exploración y explotación de REE presentan concentraciones entre la decena y centena de ppm, sobresaliendo el depósito de placer Browns Range.

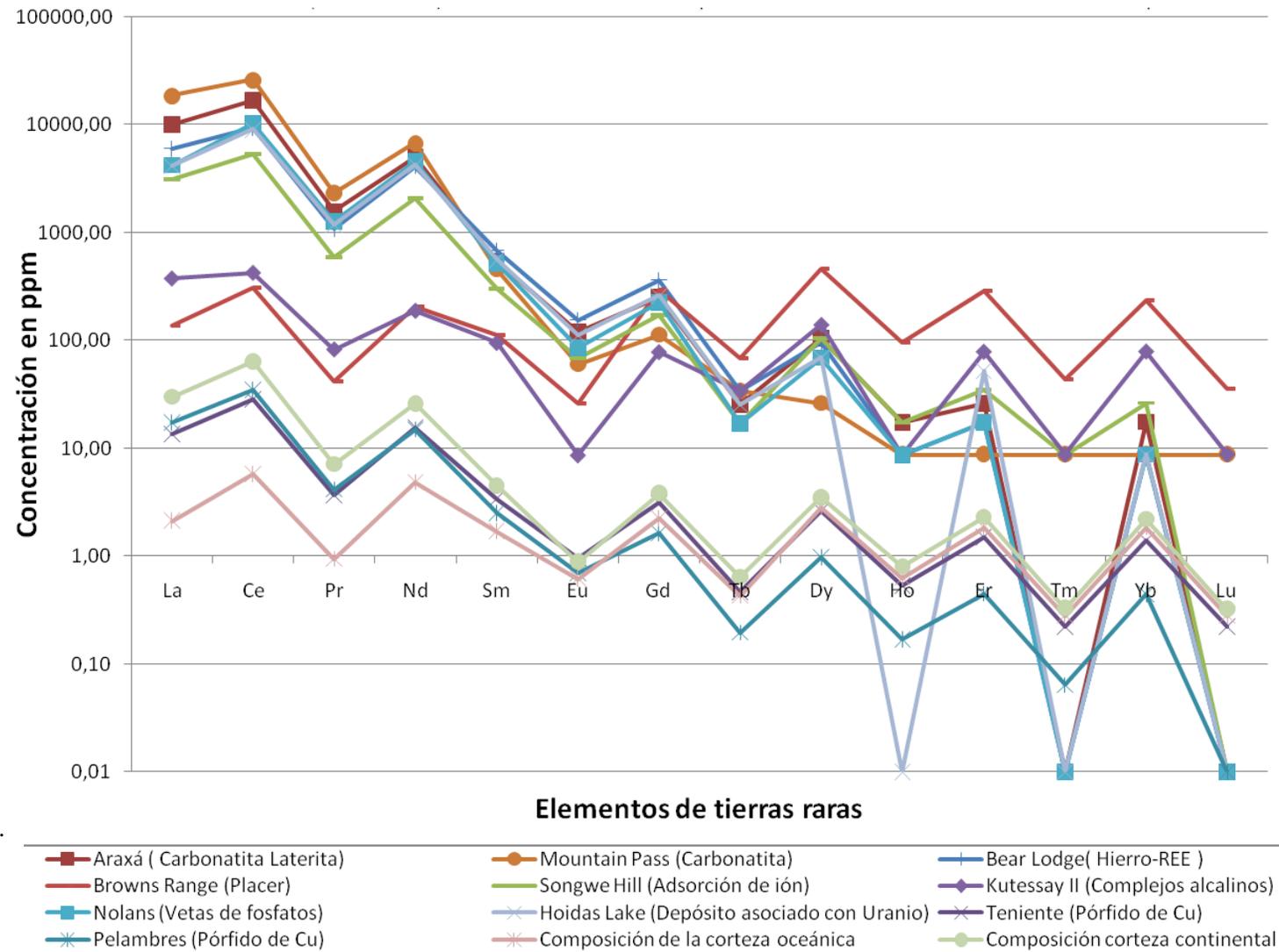


Figura 5.2. Concentración de REE en proyectos de exploración y explotación de REE, pórfidos cupríferos, corteza oceánica y corteza continental.

5.2 Análisis univariable

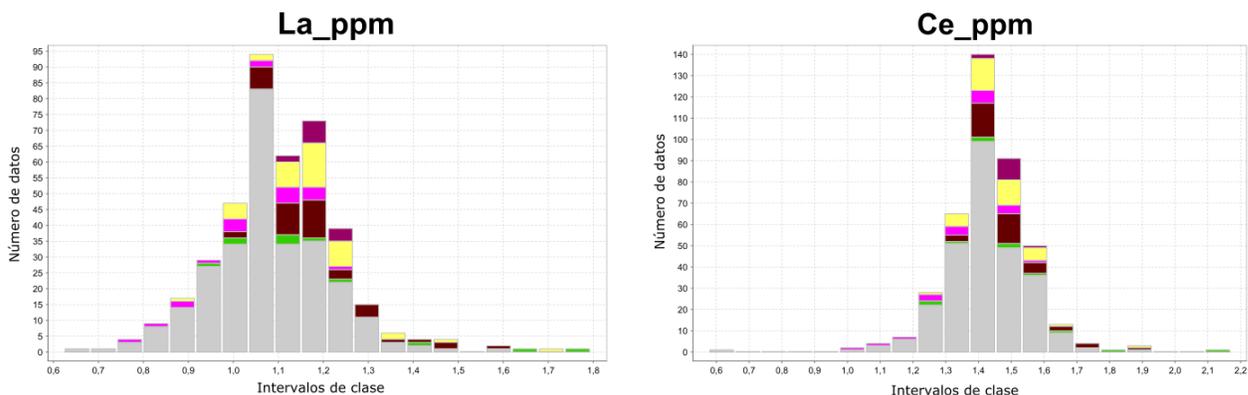
5.2.1 Histogramas

Los histogramas realizados (Figuras 5.3; 5.4 y 5.5) muestran la distribución de los elementos por unidad litológica. De esta manera, se tiene un panorama general de las distribuciones que presenta cada litología con los elementos de tierras raras.

El eje vertical representa la frecuencia, en este caso, la cantidad de población en cada litología. Según sea el caso, se ubica en un determinado valor de concentraciones similares del eje horizontal.

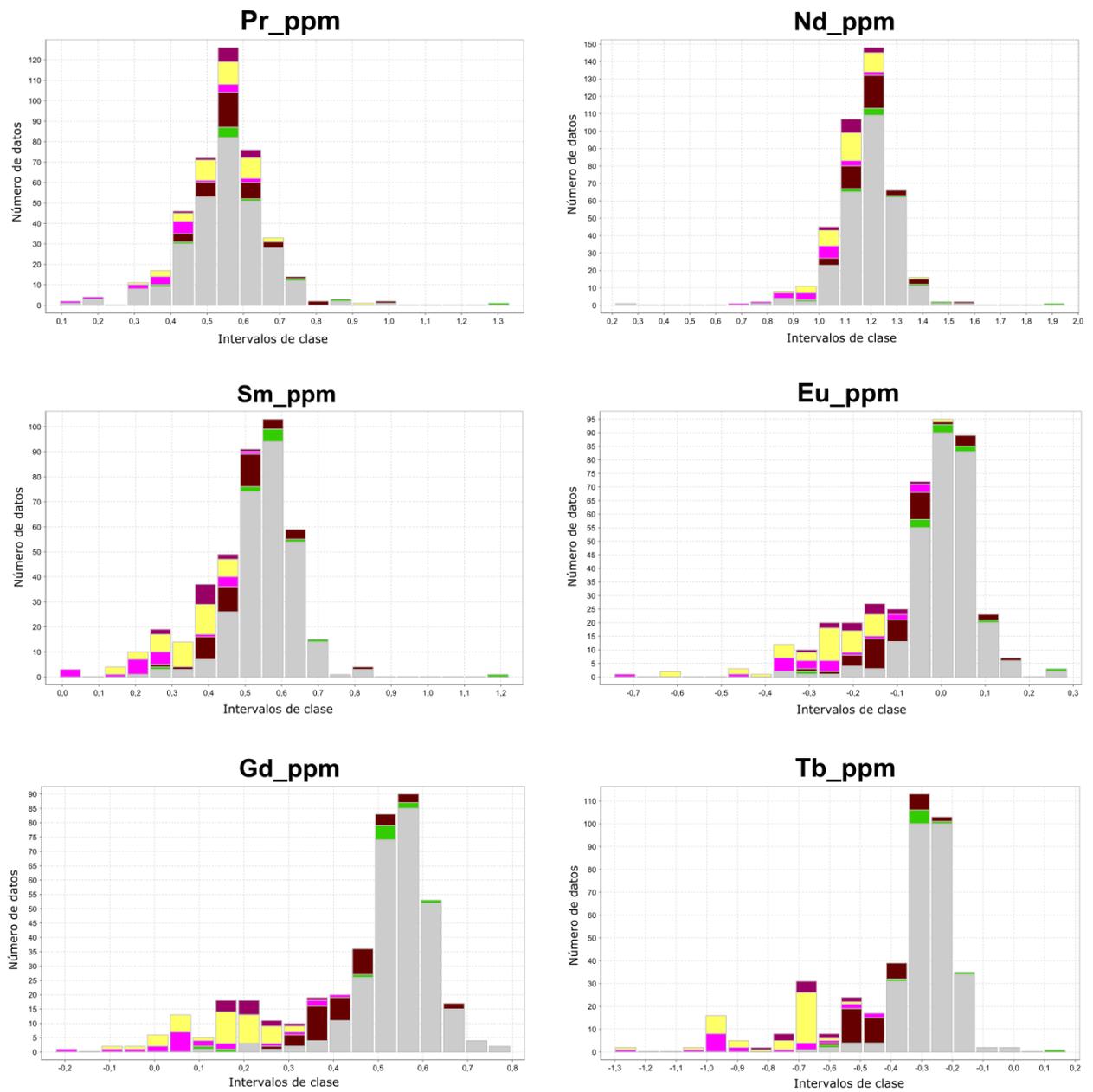
Los histogramas muestran que la distribución de los elementos de tierras raras se asemejan a un lognormal en cada una de las litologías.

Los elementos La, Ce, Pr, Nd presentan una población bien definida en todas las litologías, mientras que en los elementos Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu se observa que existen dos poblaciones de datos bien definidas, entre CMET y BXANH_BXQZ, versus TO, PDA y PDI.



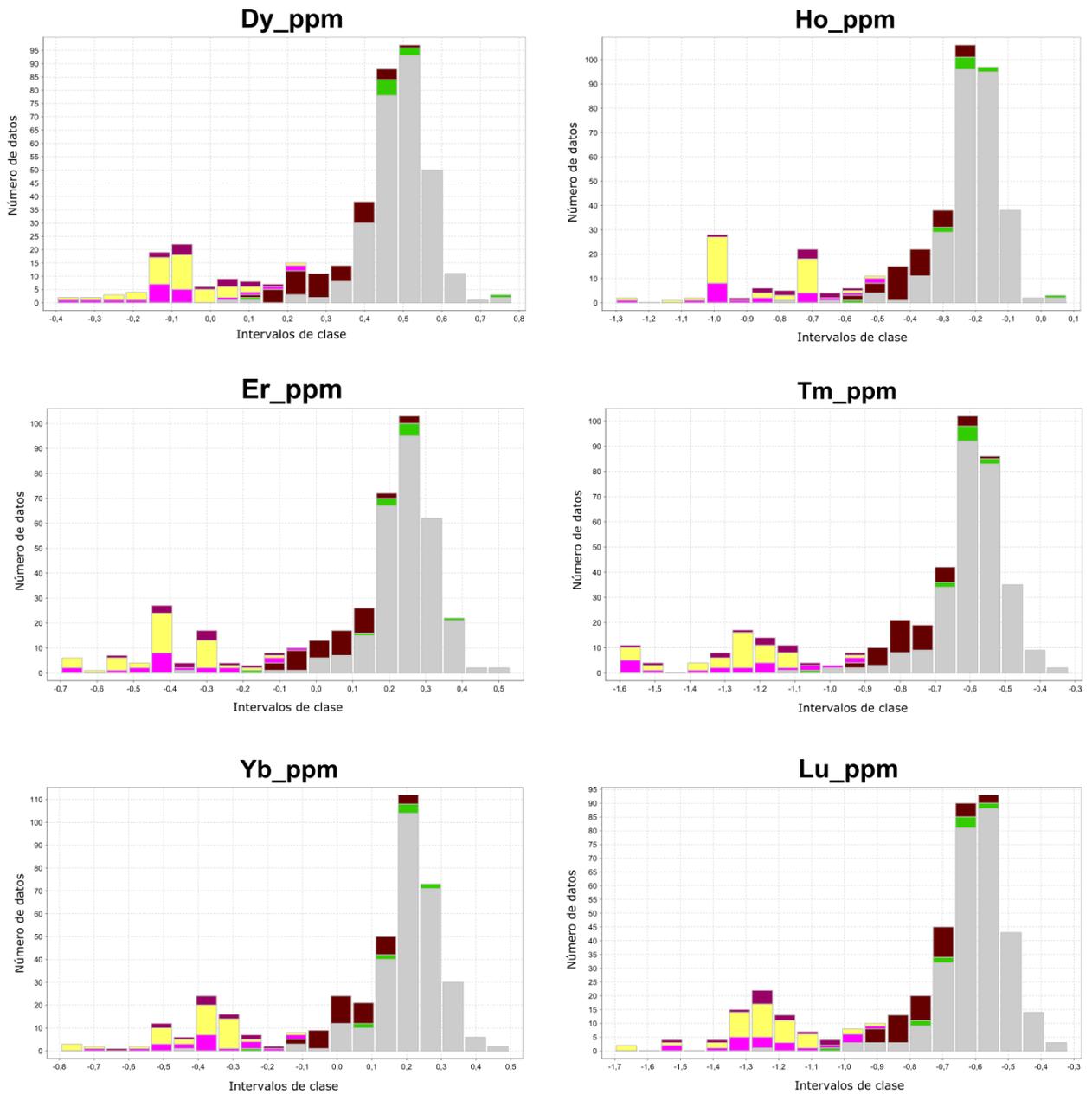
Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CBB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.3. Histogramas de lantano y cerio según litologías. Los colores de la leyenda corresponden a los tonos utilizados en la mina para cada litología (Continuación en pág. 53-54).



Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CBB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.4 Histogramas de praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio y terbio, según litologías. Los colores de la leyenda corresponden a los tonos utilizados en la mina para cada litología (Continuación en pág. 54).



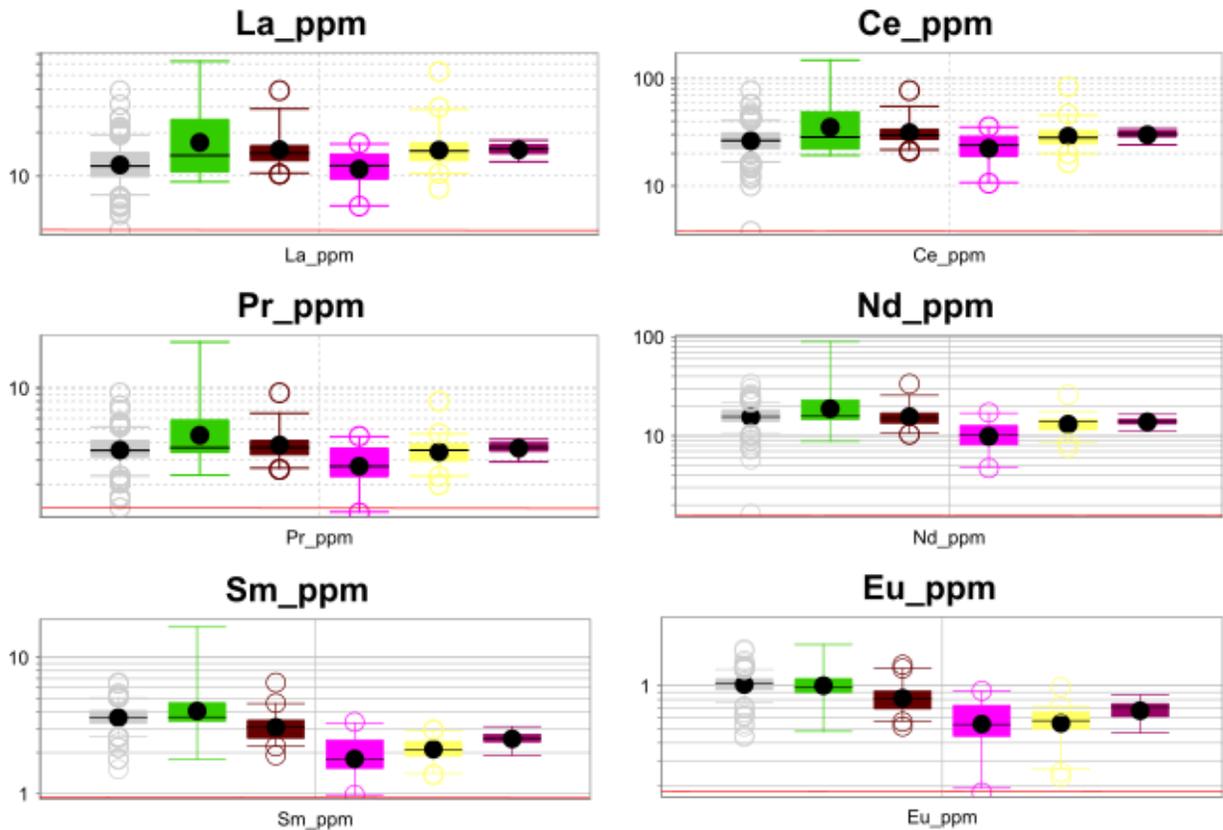
Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CBB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.5. Histogramas de disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio, según litologías. Los colores de la leyenda corresponden a los tonos utilizados en la mina para cada litología.

5.2.2 Boxplots

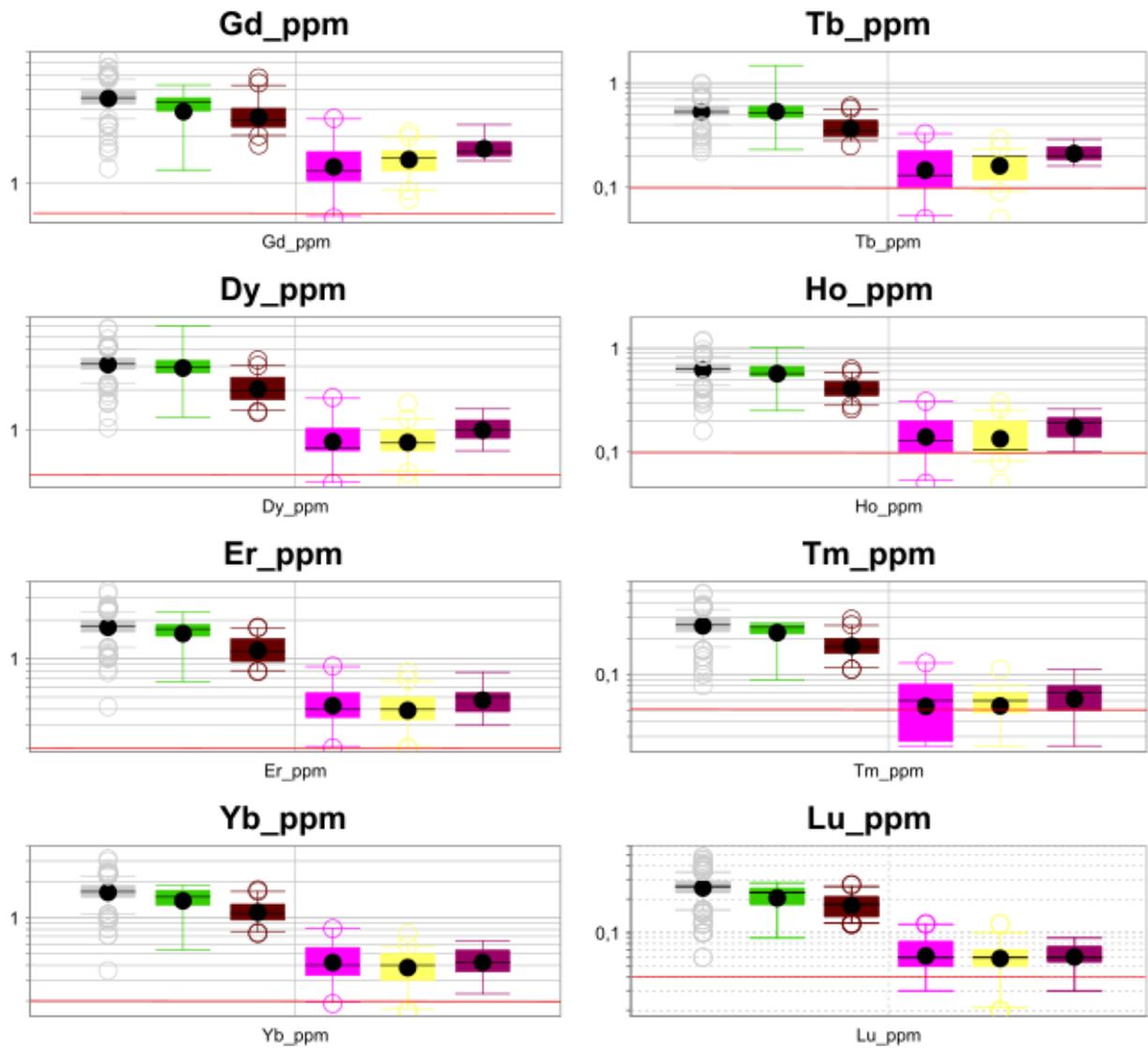
Se desarrollaron gráficos del diagrama de “caja y bigotes” o *box-plot* (Figuras 5.6 y 5.7), que permite observar la distribución estadística de un conjunto de datos.

Está compuesto por un rectángulo, la "caja", dos brazos (uno inferior y otro superior), los "bigotes", una línea y un punto. Dentro de la caja se encuentran los valores entre el primer cuartil y el tercero (Q1 a Q3), el bigote inferior corresponde al 5% de los datos, y el bigote superior al 95% de estos, la línea corresponde a la mediana y el punto es la media. Los datos graficados de círculos corresponden a los que se encuentran fuera de rango entre 5 y 95%. Las figuras 5.5 y 5.6 muestran los boxplots de los 14 elementos y sus 6 unidades en estudio.



Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CBB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.6. Boxplots con eje logarítmico base 10 de lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario y europio, por litología. Línea continua roja corresponde al límite de detección (Continuación Pág 56).



Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CBB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.7. Boxplots con eje logarítmico base 10 de gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio, por litología. Línea continua roja corresponde al límite de detección.

Se observan concentraciones similares en Lantano, Cerio, Praseodimio y Neodimio dentro de cada una de las unidades. Se destaca la importante dispersión de datos que presentan las brechas de anhidrita y de cuarzo, dado probablemente por sus clastos. Dentro de estos 4 elementos la Tonalita es la más acotada en sus rangos de concentraciones.

Samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio muestran una gran dispersión de las concentraciones con respecto a las unidades litológicas en estudio, siendo CMET, BXANH_BXQZ y CBB quienes presentan las mayores concentraciones de estos elementos, mientras que PDA, PDI y TO son las unidades que tienen las concentraciones más bajas. PDI es la unidad que presenta la mayor dispersión de datos dentro del 1^{er} y 3^{er} cuartil.

El Complejo Máfico presenta la menor dispersión de datos entre el 5 y 95% de los datos. CMET presenta en todos los elementos una alta dispersión del 5 % superior e inferior de los datos.

La línea roja de las figuras 5.6 y 5.7 representan el límite de detección (LDD) para cada elemento (Anexo E). El límite de detección (LDD) se define habitualmente como la cantidad o concentración mínima de sustancia que puede ser detectada con fiabilidad por un método analítico determinado. Intuitivamente, el LDD sería la concentración mínima obtenida a partir de la medida de una muestra (que contiene el analito) que seríamos capaces de discriminar de la concentración obtenida a partir de la medida de un blanco, es decir, de una muestra sin analito presente (Boqué, 2004).

La señal analítica puede dividirse en dos partes: una causada por él / los analitos y la otra, por los componentes de la matriz de la muestra y por la instrumentación usada en la medición. En este último, parte de la señal se conoce como ruido, y constituye información no deseada, ya que degrada la exactitud y precisión del análisis, a la vez que aumenta el límite de detección.

PDI muestra los valores de las concentraciones mínimas más afectadas con el LDD dentro de todas las litologías, principalmente en HREE. Dentro de Sm, Eu y Er el límite se presenta en los datos fuera de rango menor 5%. En Pr, Gd, Dy, Yb y Lu se tiene el límite de detección sobre el brazo inferior, correspondiente al menos por el 5 % de los datos. Tb y Ho lo presentan en el borde inferior de la caja de PDI, correspondiente a los valores del primer cuartil (Q1). El caso más crítico se tiene en PDI con las concentraciones de tulio, donde el límite está en el centro de la caja, afectando directamente la validez de los datos entre en el primer y tercer cuartil.

Los límites de detección en CMET y PDA comprenden los datos fuera de rango menor al 5% en La, Ce, Pr, Nd y Dy, correspondientemente.

Se tiene que el límite sobre el brazo inferior correspondiente al 5 % de los datos implica a PDA en Tb, Er, Yb, Lu y TO en Lu.

El límite comprende el borde inferior de la caja de Ho y Tm en PDA, y Lu en TO, correspondiente a los valores del primer cuartil (Q1).

Al disminuir significativamente las concentraciones en las tierras raras pesadas se hace más difícil distinguir las señales respecto del ruido, lo que ocasiona una disminución en la exactitud y precisión de las mediciones.

5.3 Análisis multivariable

5.3.1 Matriz de correlación

La relación entre dos variables puede ser resumida a través de un coeficiente, llamado coeficiente de correlación lineal, que mide el grado de “proporcionalidad” que existe entre ambas variables. El grado de correlación mide la intensidad de relación lineal, ya sea directa, inversa o inexistente entre dos variables. Se dice que es directa si tiene signo positivo, inversa de signo negativo y nula cuando el valor sea aproximadamente igual a cero. Las variables de un conjunto de datos presentan una muy alta correlación, si el coeficiente de correlación se encuentra entre 0,9 y 1,0; altamente correlacionado, si el coeficiente de correlación está entre 0,7 y 0,89; moderadamente correlacionadas si la magnitud se encuentra entre 0,4 y 0,69; correlación baja, si el valor se encuentra entre 0.2 y 0.39 (Suárez *et al*, 2012).

La matriz de correlación (Tabla 5.3 a 5.9) muestra la interdependencia que tienen las variables unas con otras. Se expone el promedio de las litologías, además de cada litología en estudio: CMET, BXANH_BXQZ, CBB, PDI, PDA, TO.

Tabla 5.3. Matriz de correlación del promedio de las concentraciones de Tierras raras. Se ha encerrado en rectángulos rojos las tierras raras livianas y pesadas. Los colores representan la correlación entre las tierras raras que varían entre verde, amarillo, naranja y rojo entre la escala [0,1]. La correlación es directa o positiva si el coeficiente de correlación es positivo, e inversa o negativa si el coeficiente es negativo.

Correlación	LREE					HREE								
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,95	0,88	0,78	0,54	0,21	0,07	0,17	0,06	0,03	0	-0	-0	-0
Ce	0,95	1	0,96	0,88	0,69	0,34	0,19	0,33	0,21	0,17	0,14	0,13	0,1	0,11
Pr	0,88	0,96	1	0,96	0,82	0,47	0,29	0,47	0,35	0,31	0,27	0,24	0,22	0,22
Nd	0,78	0,88	0,96	1	0,91	0,59	0,44	0,62	0,51	0,47	0,44	0,41	0,38	0,37
Sm	0,54	0,69	0,82	0,91	1	0,81	0,7	0,86	0,78	0,75	0,71	0,68	0,66	0,64
Eu	0,21	0,34	0,47	0,59	0,81	1	0,85	0,87	0,87	0,84	0,82	0,79	0,78	0,75
Gd	0,07	0,19	0,29	0,44	0,7	0,85	1	0,9	0,93	0,93	0,93	0,92	0,93	0,91
Tb	0,17	0,33	0,47	0,62	0,86	0,87	0,9	1	0,97	0,96	0,94	0,92	0,91	0,88
Dy	0,06	0,21	0,35	0,51	0,78	0,87	0,93	0,97	1	0,99	0,98	0,96	0,96	0,93
Ho	0,03	0,17	0,31	0,47	0,75	0,84	0,93	0,96	0,99	1	0,99	0,97	0,97	0,96
Er	0	0,14	0,27	0,44	0,71	0,82	0,93	0,94	0,98	0,99	1	0,98	0,99	0,97
Tm	-0	0,13	0,24	0,41	0,68	0,79	0,92	0,92	0,96	0,97	0,98	1	0,98	0,97
Yb	-0	0,1	0,22	0,38	0,66	0,78	0,93	0,91	0,96	0,97	0,99	0,98	1	0,98
Lu	-0	0,11	0,22	0,37	0,64	0,75	0,91	0,88	0,93	0,96	0,97	0,97	0,98	1

Tabla 5.4. Matriz de correlación de tierras raras en el Complejo Máfico El teniente.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,94	0,95	0,87	0,77	0,48	0,58	0,47	0,41	0,41	0,39	0,38	0,38	0,4
Ce	0,94	1	0,95	0,88	0,81	0,49	0,64	0,54	0,47	0,48	0,46	0,47	0,46	0,48
Pr	0,95	0,95	1	0,94	0,89	0,58	0,72	0,61	0,55	0,55	0,53	0,53	0,51	0,54
Nd	0,87	0,88	0,94	1	0,92	0,62	0,79	0,7	0,67	0,66	0,64	0,62	0,62	0,63
Sm	0,77	0,81	0,89	0,92	1	0,75	0,91	0,84	0,81	0,8	0,77	0,74	0,73	0,72
Eu	0,48	0,49	0,58	0,62	0,75	1	0,74	0,7	0,71	0,64	0,61	0,54	0,52	0,46
Gd	0,58	0,64	0,72	0,79	0,91	0,74	1	0,91	0,91	0,89	0,86	0,81	0,82	0,76
Tb	0,47	0,54	0,61	0,7	0,84	0,7	0,91	1	0,94	0,92	0,89	0,86	0,85	0,81
Dy	0,41	0,47	0,55	0,67	0,81	0,71	0,91	0,94	1	0,96	0,95	0,88	0,91	0,83
Ho	0,41	0,48	0,55	0,66	0,8	0,64	0,89	0,92	0,96	1	0,96	0,91	0,94	0,89
Er	0,39	0,46	0,53	0,64	0,77	0,61	0,86	0,89	0,95	0,96	1	0,92	0,96	0,9
Tm	0,38	0,47	0,53	0,62	0,74	0,54	0,81	0,86	0,88	0,91	0,92	1	0,93	0,92
Yb	0,38	0,46	0,51	0,62	0,73	0,52	0,82	0,85	0,91	0,94	0,96	0,93	1	0,94
Lu	0,4	0,48	0,54	0,63	0,72	0,46	0,76	0,81	0,83	0,89	0,9	0,92	0,94	1

Tabla 5.5. Matriz de correlación de tierras raras de Brechas de anhidrita y cuarzo.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,98	0,94	0,92	0,89	0,84	-0,4	0,91	0,78	0,68	0,48	0,11	-0,1	-0,3
Ce	0,98	1	0,99	0,98	0,96	0,89	-0,5	0,97	0,86	0,77	0,56	0,16	-0,1	-0,3
Pr	0,94	0,99	1	1	0,99	0,9	-0,5	0,98	0,89	0,81	0,59	0,18	-0,1	-0,3
Nd	0,92	0,98	1	1	1	0,91	-0,5	0,98	0,91	0,83	0,62	0,2	-0,1	-0,3
Sm	0,89	0,96	0,99	1	1	0,92	-0,5	0,99	0,93	0,86	0,66	0,25	-0	-0,2
Eu	0,84	0,89	0,9	0,91	0,92	1	-0,2	0,95	0,94	0,92	0,82	0,52	0,23	0,09
Gd	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,2	1	-0,4	-0,2	-0,1	0,15	0,53	0,74	0,79
Tb	0,91	0,97	0,98	0,98	0,99	0,95	-0,4	1	0,95	0,9	0,72	0,35	0,07	-0,1
Dy	0,78	0,86	0,89	0,91	0,93	0,94	-0,2	0,95	1	0,97	0,87	0,56	0,31	0,12
Ho	0,68	0,77	0,81	0,83	0,86	0,92	-0,1	0,9	0,97	1	0,94	0,68	0,46	0,31
Er	0,48	0,56	0,59	0,62	0,66	0,82	0,15	0,72	0,87	0,94	1	0,89	0,7	0,58
Tm	0,11	0,16	0,18	0,2	0,25	0,52	0,53	0,35	0,56	0,68	0,89	1	0,91	0,84
Yb	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	0,23	0,74	0,07	0,31	0,46	0,7	0,91	1	0,96
Lu	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	0,09	0,79	-0,1	0,12	0,31	0,58	0,84	0,96	1

Tabla 5.6. Matriz de correlación de tierras raras de Complejo de Brechas Braden.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,99	0,96	0,93	0,79	0,61	0,64	0,49	0,25	0,19	0,14	0,08	0,03	0,08
Ce	0,99	1	0,99	0,97	0,86	0,69	0,72	0,56	0,33	0,26	0,21	0,16	0,09	0,12
Pr	0,96	0,99	1	0,99	0,91	0,75	0,78	0,61	0,39	0,31	0,27	0,21	0,15	0,16
Nd	0,93	0,97	0,99	1	0,94	0,81	0,83	0,67	0,47	0,39	0,33	0,27	0,21	0,18
Sm	0,79	0,86	0,91	0,94	1	0,86	0,94	0,83	0,67	0,58	0,54	0,47	0,41	0,36
Eu	0,61	0,69	0,75	0,81	0,86	1	0,86	0,76	0,67	0,59	0,56	0,46	0,42	0,31
Gd	0,64	0,72	0,78	0,83	0,94	0,86	1	0,93	0,83	0,76	0,71	0,63	0,59	0,5
Tb	0,49	0,56	0,61	0,67	0,83	0,76	0,93	1	0,94	0,88	0,85	0,72	0,74	0,66
Dy	0,25	0,33	0,39	0,47	0,67	0,67	0,83	0,94	1	0,97	0,96	0,82	0,87	0,79
Ho	0,19	0,26	0,31	0,39	0,58	0,59	0,76	0,88	0,97	1	0,98	0,88	0,91	0,85
Er	0,14	0,21	0,27	0,33	0,54	0,56	0,71	0,85	0,96	0,98	1	0,89	0,95	0,91
Tm	0,08	0,16	0,21	0,27	0,47	0,46	0,63	0,72	0,82	0,88	0,89	1	0,87	0,84
Yb	0,03	0,09	0,15	0,21	0,41	0,42	0,59	0,74	0,87	0,91	0,95	0,87	1	0,94
Lu	0,08	0,12	0,16	0,18	0,36	0,31	0,5	0,66	0,79	0,85	0,91	0,84	0,94	1

Tabla 5.7. Matriz de correlación de tierras raras del Pórfido diorítico.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,97	0,9	0,86	0,7	0,52	0,69	0,6	0,62	0,53	0,6	0,68	0,68	0,68
Ce	0,97	1	0,97	0,91	0,72	0,52	0,71	0,61	0,64	0,55	0,62	0,71	0,72	0,73
Pr	0,9	0,97	1	0,91	0,74	0,47	0,73	0,62	0,65	0,58	0,64	0,7	0,72	0,71
Nd	0,86	0,91	0,91	1	0,94	0,75	0,92	0,83	0,86	0,78	0,85	0,84	0,86	0,86
Sm	0,7	0,72	0,74	0,94	1	0,87	0,97	0,91	0,94	0,88	0,93	0,86	0,87	0,86
Eu	0,52	0,52	0,47	0,75	0,87	1	0,87	0,85	0,9	0,8	0,85	0,83	0,83	0,86
Gd	0,69	0,71	0,73	0,92	0,97	0,87	1	0,95	0,98	0,92	0,96	0,89	0,89	0,87
Tb	0,6	0,61	0,62	0,83	0,91	0,85	0,95	1	0,94	0,97	0,92	0,9	0,82	0,79
Dy	0,62	0,64	0,65	0,86	0,94	0,9	0,98	0,94	1	0,93	0,98	0,9	0,91	0,89
Ho	0,53	0,55	0,58	0,78	0,88	0,8	0,92	0,97	0,93	1	0,93	0,9	0,83	0,79
Er	0,6	0,62	0,64	0,85	0,93	0,85	0,96	0,92	0,98	0,93	1	0,9	0,93	0,89
Tm	0,68	0,71	0,7	0,84	0,86	0,83	0,89	0,9	0,9	0,9	0,9	1	0,89	0,9
Yb	0,68	0,72	0,72	0,86	0,87	0,83	0,89	0,82	0,91	0,83	0,93	0,89	1	0,97
Lu	0,68	0,73	0,71	0,86	0,86	0,86	0,87	0,79	0,89	0,79	0,89	0,9	0,97	1

Tabla 5.8. Matriz de correlación de tierras raras del Pórfido dacítico.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,98	0,91	0,8	0,39	0,09	0,02	-0,1	0,02	-0	0,08	0,11	0,14	0,18
Ce	0,98	1	0,96	0,87	0,49	0,12	0,13	0,04	0,09	0,02	0,13	0,15	0,16	0,18
Pr	0,91	0,96	1	0,94	0,67	0,25	0,33	0,22	0,24	0,13	0,25	0,25	0,25	0,23
Nd	0,8	0,87	0,94	1	0,84	0,34	0,54	0,4	0,41	0,29	0,35	0,38	0,34	0,26
Sm	0,39	0,49	0,67	0,84	1	0,59	0,87	0,71	0,73	0,58	0,61	0,59	0,52	0,38
Eu	0,09	0,12	0,25	0,34	0,59	1	0,71	0,57	0,72	0,62	0,75	0,58	0,66	0,65
Gd	0,02	0,13	0,33	0,54	0,87	0,71	1	0,84	0,86	0,76	0,73	0,68	0,58	0,47
Tb	-0,1	0,04	0,22	0,4	0,71	0,57	0,84	1	0,81	0,71	0,72	0,69	0,6	0,5
Dy	0,02	0,09	0,24	0,41	0,73	0,72	0,86	0,81	1	0,9	0,94	0,83	0,84	0,74
Ho	-0	0,02	0,13	0,29	0,58	0,62	0,76	0,71	0,9	1	0,85	0,77	0,78	0,72
Er	0,08	0,13	0,25	0,35	0,61	0,75	0,73	0,72	0,94	0,85	1	0,84	0,92	0,89
Tm	0,11	0,15	0,25	0,38	0,59	0,58	0,68	0,69	0,83	0,77	0,84	1	0,88	0,78
Yb	0,14	0,16	0,25	0,34	0,52	0,66	0,58	0,6	0,84	0,78	0,92	0,88	1	0,93
Lu	0,18	0,18	0,23	0,26	0,38	0,65	0,47	0,5	0,74	0,72	0,89	0,78	0,93	1

Tabla 5.9. Matriz de correlación de tierras raras de Tonalita.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1	0,96	0,87	0,84	0,86	0,51	0,41	0,74	0,73	0,51	0,65	0,52	0,66	0,58
Ce	0,96	1	0,96	0,94	0,94	0,69	0,53	0,79	0,78	0,58	0,72	0,58	0,76	0,71
Pr	0,87	0,96	1	0,98	0,96	0,81	0,63	0,77	0,78	0,55	0,7	0,53	0,78	0,76
Nd	0,84	0,94	0,98	1	0,97	0,83	0,72	0,81	0,82	0,63	0,74	0,59	0,81	0,79
Sm	0,86	0,94	0,96	0,97	1	0,77	0,69	0,84	0,87	0,66	0,74	0,63	0,85	0,81
Eu	0,51	0,69	0,81	0,83	0,77	1	0,77	0,71	0,74	0,58	0,69	0,56	0,76	0,78
Gd	0,41	0,53	0,63	0,72	0,69	0,77	1	0,8	0,77	0,66	0,73	0,59	0,74	0,78
Tb	0,74	0,79	0,77	0,81	0,84	0,71	0,8	1	0,96	0,85	0,95	0,81	0,93	0,91
Dy	0,73	0,78	0,78	0,82	0,87	0,74	0,77	0,96	1	0,88	0,95	0,87	0,97	0,92
Ho	0,51	0,58	0,55	0,63	0,66	0,58	0,66	0,85	0,88	1	0,92	0,96	0,88	0,84
Er	0,65	0,72	0,7	0,74	0,74	0,69	0,73	0,95	0,95	0,92	1	0,9	0,95	0,93
Tm	0,52	0,58	0,53	0,59	0,63	0,56	0,59	0,81	0,87	0,96	0,9	1	0,87	0,84
Yb	0,66	0,76	0,78	0,81	0,85	0,76	0,74	0,93	0,97	0,88	0,95	0,87	1	0,98
Lu	0,58	0,71	0,76	0,79	0,81	0,78	0,78	0,91	0,92	0,84	0,93	0,84	0,98	1

A continuación se describen las características que se destacan entre los elementos de tierras raras y las correlaciones inusuales.

En el promedio de tierras raras se observan dos grupos principales dentro de estos 14 elementos metálicos: los de bajo peso atómico, desde La (57) a Sm (62); y los de alto peso atómico, desde Eu (62) a Lu (71). Se tiene una estrecha relación entre tierras raras livianas, con una muy baja dependencia con las tierras raras pesadas. De igual modo, las tierras raras pesadas tienen una alta correlación entre sí, pero una muy baja con las tierras raras livianas. Los elementos de tierras raras más livianos son más incompatibles (porque poseen un mayor radio iónico) y por lo tanto se encuentran concentrados en mayor medida en la corteza terrestre que los elementos de tierras raras más pesados. Se destaca que samario presenta una moderada correlación con La y Ce; y alta con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho y Er. Eu presenta una correlación alta con samario.

Una correlación muy alta indicaría que hay elementos que presentan una relación lineal entre ellos.

En CMET se tiene una alta a muy alta correlación entre LREE y HREE. Sobresale la alta correlación de samario con las tierras raras pesadas; además europio presenta correlaciones moderadas con Ho, Er, Tm, Yb y Lu (Tabla 5.4).

Las brechas de anhidrita y cuarzo presentan correlaciones muy altas entre LREE. Se resalta la muy alta correlación de Eu y Tb con LREE; y alta de Dy y Ho con LREE. Gadolinio no presenta relación alguna con la mayoría de los elementos, salvo yterbio y lutecio. Tulio presenta

moderada correlación con Eu, Gd, Tb, Dy y Ho; y altas con yterbio y lutecio. Yterbio y lutecio presentan muy bajas a nula correlación con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho y Er; y muy altas entre ellas. (Tabla 5.5).

CBB tiene correlaciones muy altas entre LREE. Europio presenta una alta correlación con algunas LREE, Pr, Nd y Sm, además de Gd y Tb; moderada con Dy, Ho, Er, Tm y baja con Tm, Yb y Lu. Gadolinio presenta altas correlaciones con Ce, Pr, Nd y Sm en LREE, además de Eu, Dy, Ho e Yb; y muy alta con terbio. Entre Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu se presentan altas a muy altas correlaciones. (Tabla 5.6).

PDI tiene una alta correlación entre La, Ce, Pr y Nd, y alta con respecto a Sm. Nd y Sm tiene alta correlación con HREE. HREE señalan una alta a muy alta correlación entre sí (Tabla 5.8).

PDA presenta altas a muy altas correlaciones entre LREE y HREE, salvo samario, que tiene baja correlación con lantano y moderada con cerio, europio, holmio, erbio, tulio, yterbio. Lutecio tiene baja correlación con gadolinio y terbio (Tabla 5.9).

TO tiene muy alta correlación entre tierras raras livianas. HREE presentan alta a muy alta correlación entre sí, salvo Eu y Gd. Europio muestra alta correlación con Pr, Nd, Sm y moderada con Ho, Er y Tm. Gadolinio tiene alta correlación con Nd y moderada con Ho y Tm (Tabla 5.10).

Se han realizado *Scatter plots* o diagramas de dispersión para los elementos de La, Eu y Lu (Figura 5.8, 5.9 y 5.10) con las tierras raras. Los datos se muestran como un conjunto de puntos, cada uno con el valor de una variable que determina la posición en el eje horizontal y el valor de la otra variable determinado por la posición en el eje vertical. El diagrama de dispersión exhibe el grado de correlación entre las dos variables.

Estos gráficos contienen la información visual de la matriz de correlación y aún más, ya que se pueden observar variaciones no lineales.

Se observa correlación lineal de lantano con cerio, praseodimio, neodimio y samario; europio principalmente con terbio, disprosio, holmio, erbio e yterbio, y lutecio presenta una correlación lineal perfecta con tulio.

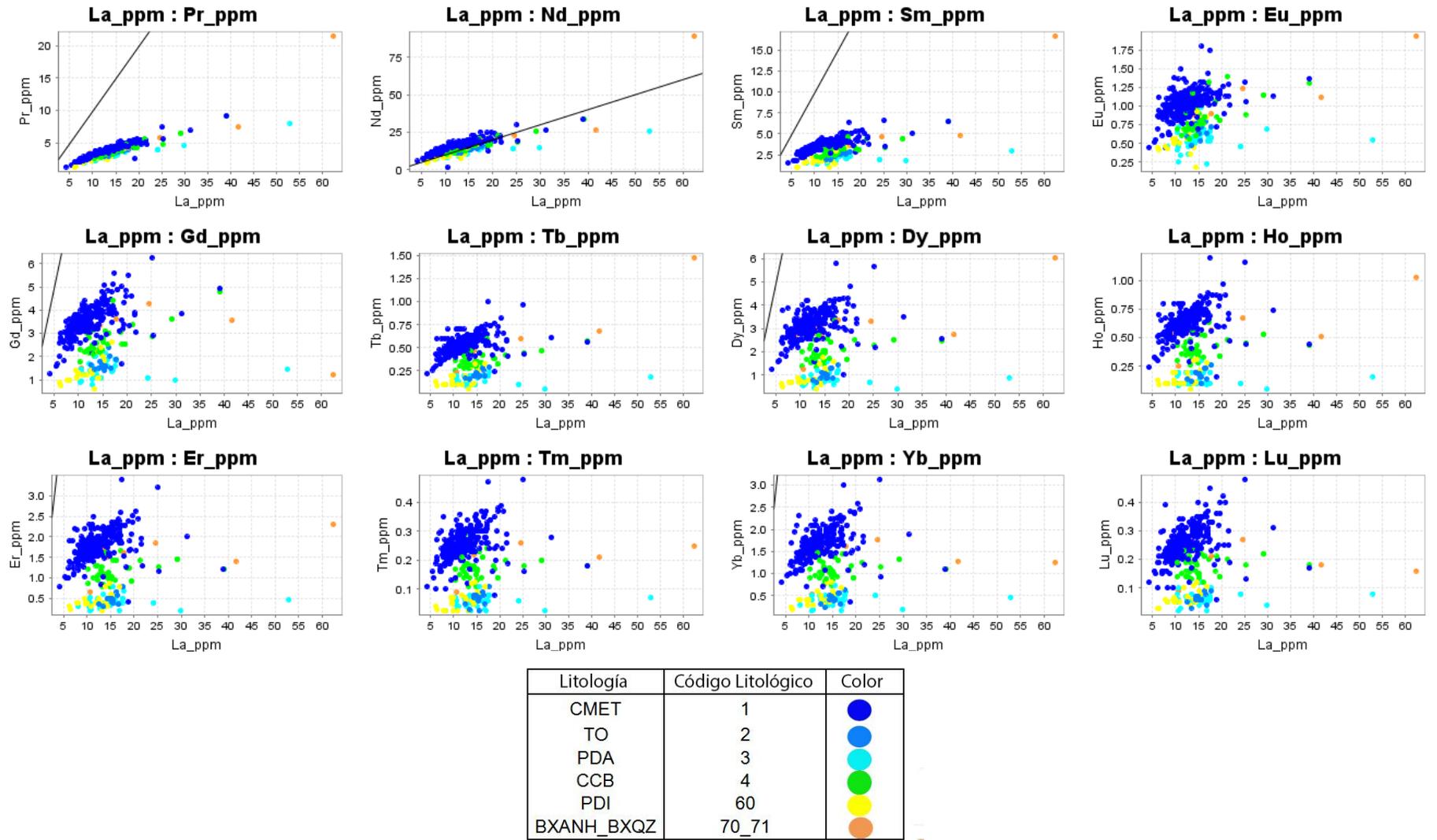
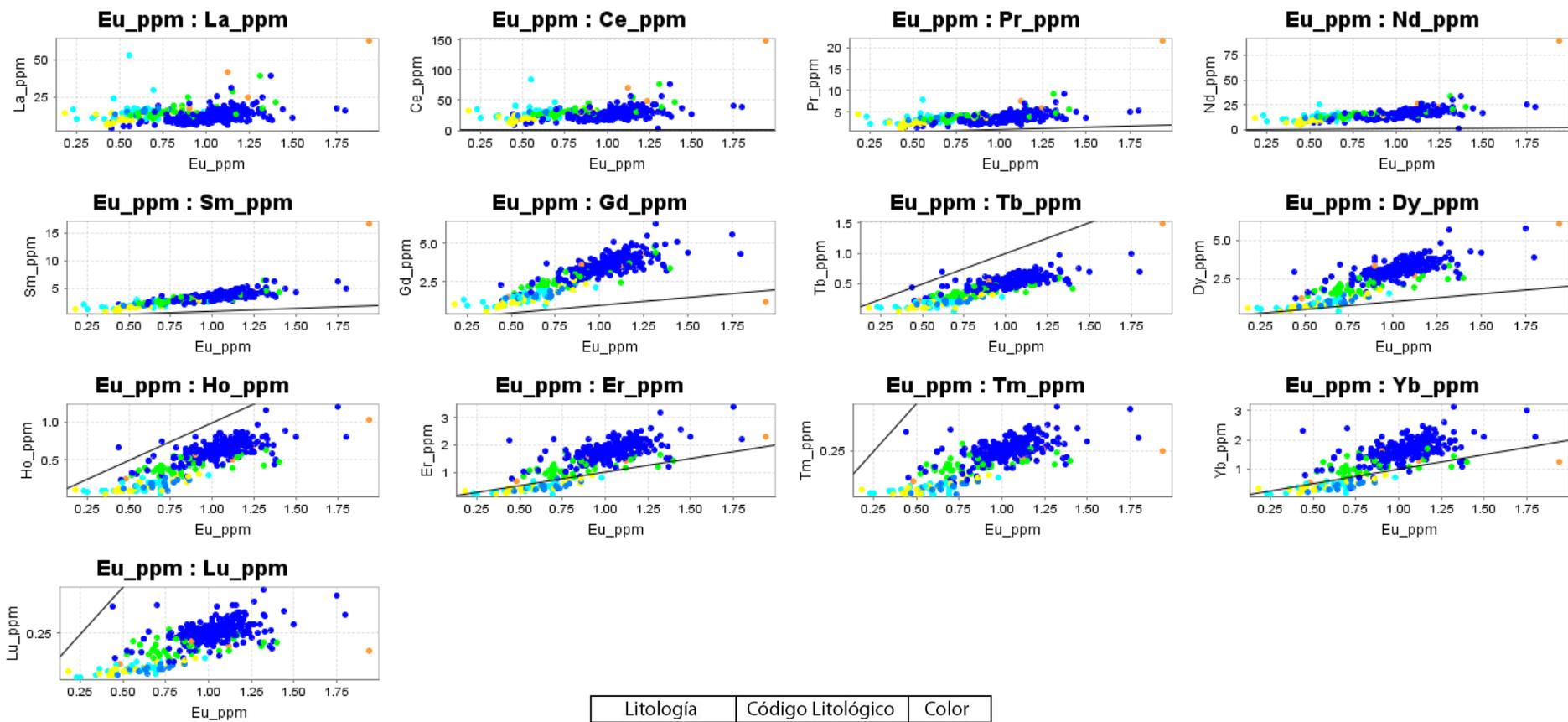
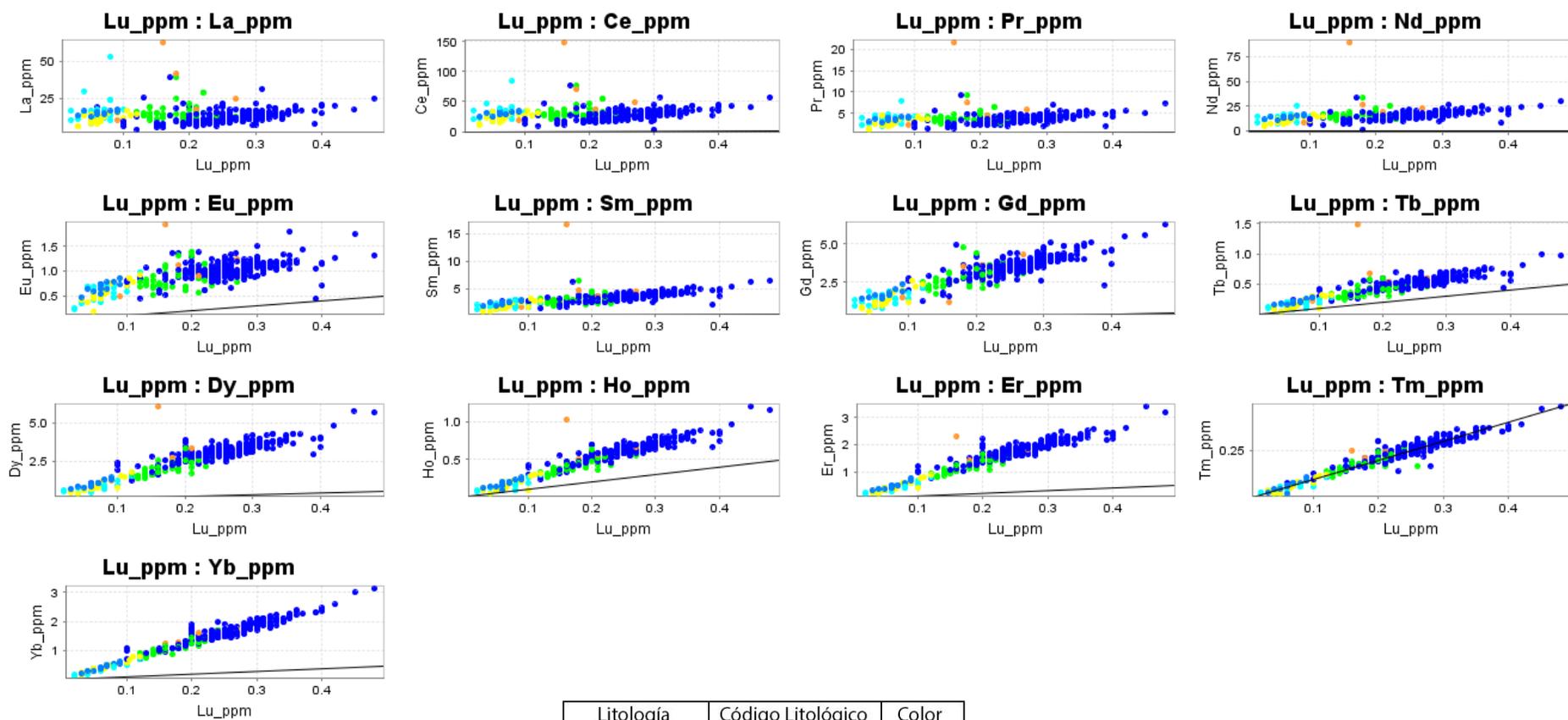


Figura 5.8. Scatter plot de La versus tierras raras.



Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	● (Dark Blue)
TO	2	● (Light Blue)
PDA	3	● (Cyan)
CCB	4	● (Green)
PDI	60	● (Yellow)
BXANH_BXQZ	70_71	● (Orange)

Figura 5.9. Scatter plot de Eu versus tierras raras.



Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CCB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.10. Scatter plot de Lu versus tierras raras.

5.3.2 Redes Neuronales Artificiales

Los datos químicos seleccionados fueron analizados utilizando redes neuronales artificiales no-supervisadas del tipo *Growing Cell Structures* (GCS; Fritzke, 1994). Como resultado de este análisis se generó un mapa bi-dimensional o “mapa neuronal”, compuesto por 6 unidades o “nodos” interconectados (Figura 5.11). Cada uno de estos nodos representa un subconjunto de muestras del arreglo de datos con características químicas similares.

Este método se utilizó para establecer el grado de similitud en términos geoquímicos de CMET, PDI, PDA CBB, BXANH_BXQZ y TO.

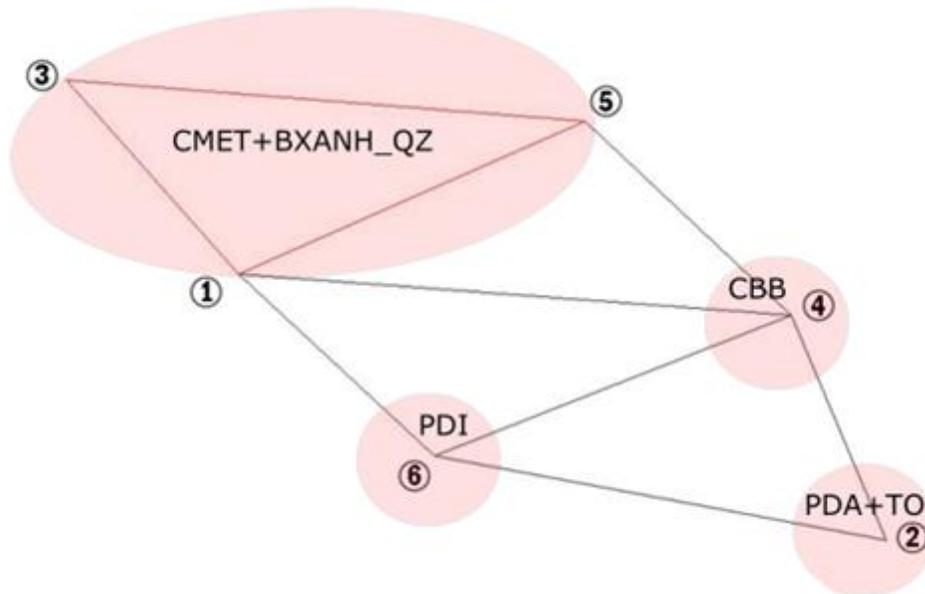


Figura 5.11. Red del tipo GCS compuesta por 6 nodos correspondiente al arreglo total de datos. Cada número representa un cluster de muestras con comportamiento químico similar. Los círculos rojos comprenden las litologías representativas de los nodos.

Se presenta a continuación la red neuronal artificial obtenida y su detalle para cada elemento considerado en este estudio (Figura 5.12 y 5.13). La barra multicolor que se encuentra a la derecha de cada gráfico, representa las concentraciones en ppm. Los colores rojos corresponden a altas concentraciones del elemento, mientras que los colores azules representan bajas concentraciones del elemento. Si para un nodo en particular se tiene que el área cercana toma tonalidades rojas, quiere decir que las muestras asociadas a ese nodo poseen en general una alta concentración de ese elemento en particular. Por el contrario, si un nodo se asocia con bajas concentraciones de un elemento, entonces las áreas circundantes a los nodos serán de tonalidades amarillas y azules.

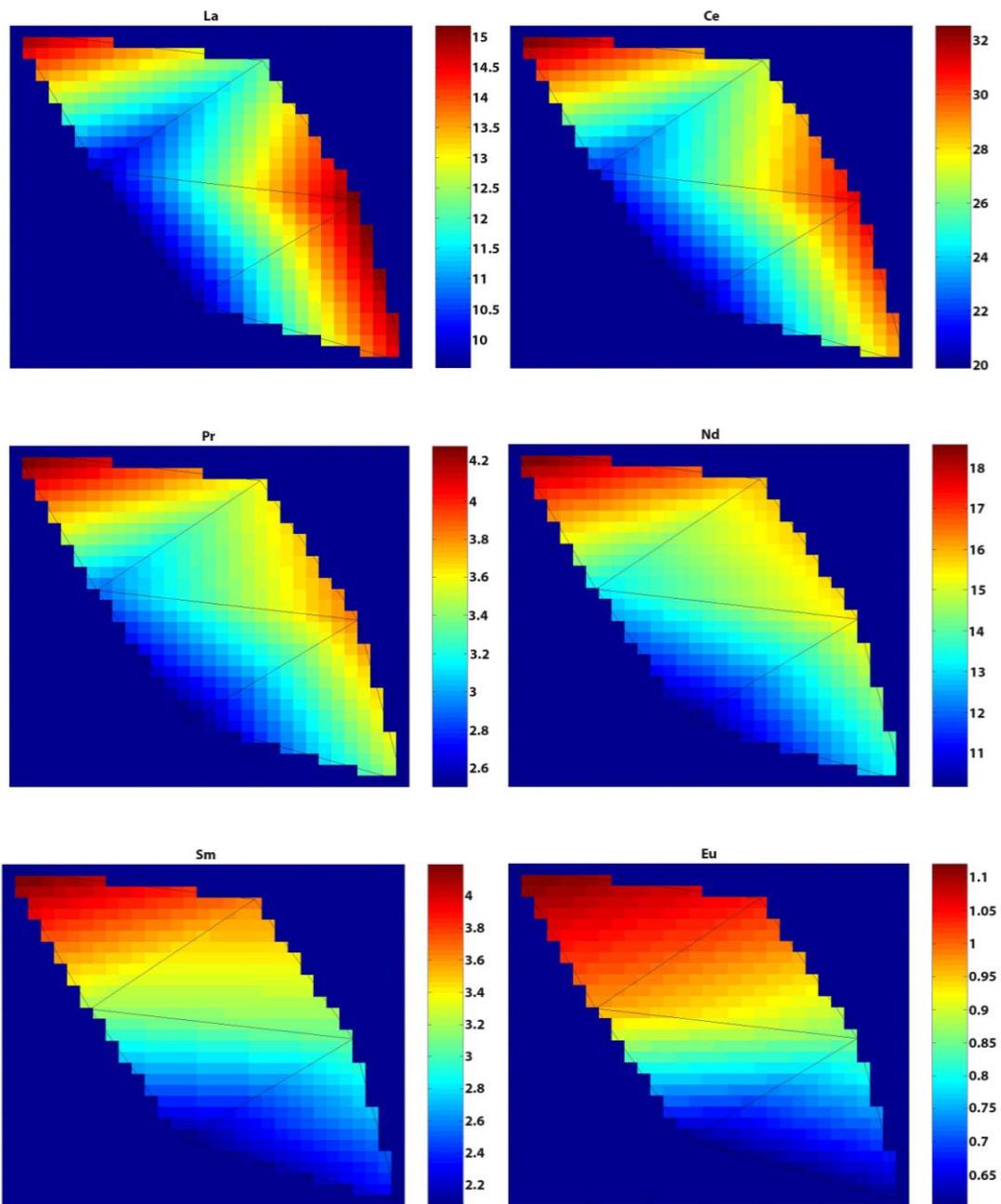


Figura 5.12. Red neuronal artificial de lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario y europio.

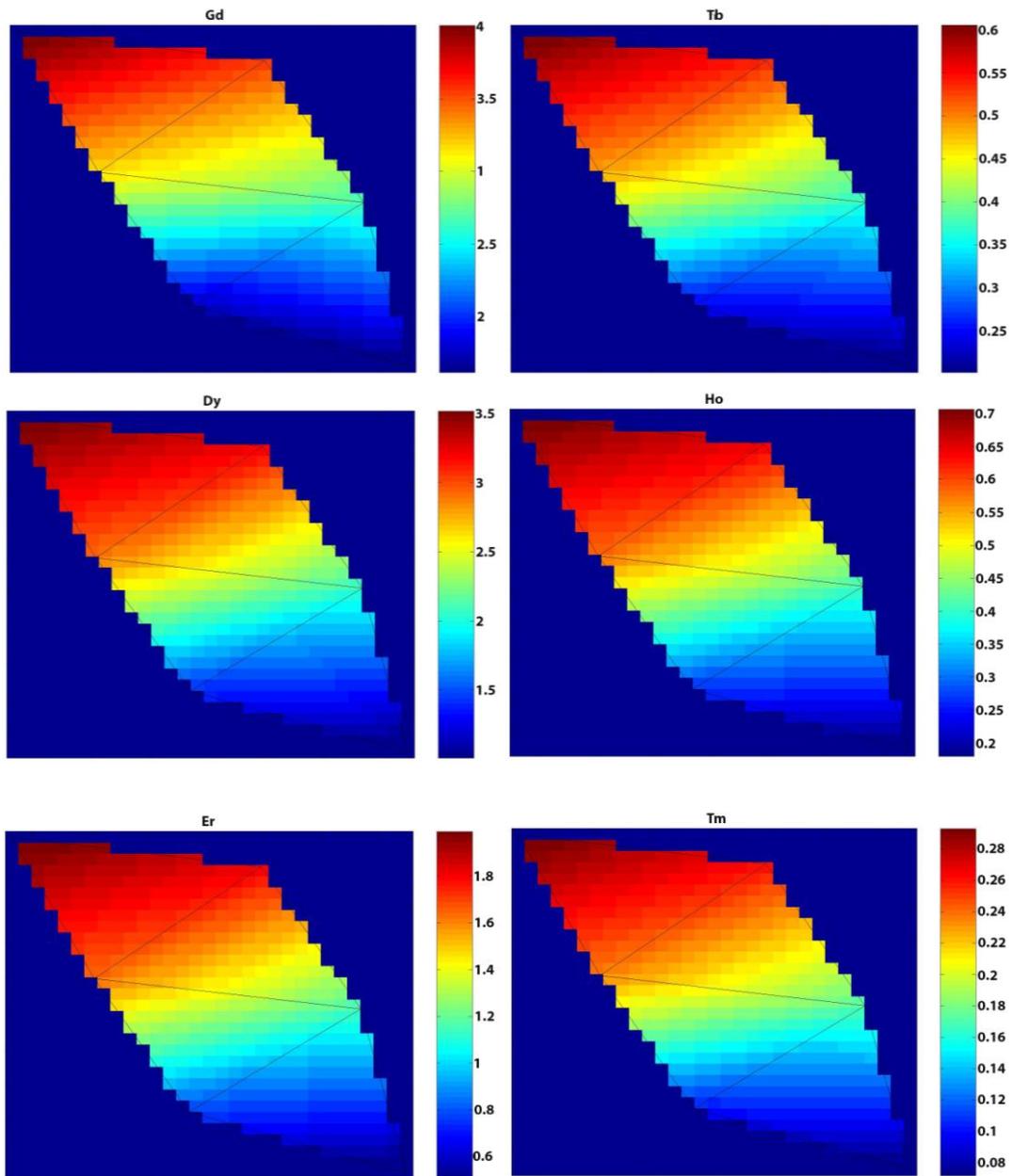


Figura 5.13. Red neuronal artificial de gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio.

Las litologías que presentan cada nodo se muestran en la Tabla 5.10. El Nodo 1 (N1) presenta 87 muestras de CMET, 2 muestras de BXANH_BXQZ, una muestra de CBB, y no presenta muestras de PDA, PDI y TO. El total de muestras que presenta el N1 es 90.

Tabla 5.10. Litologías correspondientes a cada Nodo.

Nodo	CMET	BXANH_BXQZ	CBB	PDI	PDA	TO	Total
N1	87	2	1	0	0	0	90
N2	1	0	2	8	29	12	52
N3	78	1	2	0	0	0	81
N4	8	0	27	3	1	1	40
N5	95	4	4	0	0	0	103
N6	8	1	4	10	6	0	29
Total	277	8	40	21	36	13	395

Se observa que CMET está representado aproximadamente con un 98% en los nodos 1, 3 y 5. Se presentan concentraciones altas en el nodo 3, medias en el nodo 5, y bajas en el nodo 1 para La, Ce, Pr, Nd y Sm. Desde europio a lantano, los tres nodos tienen concentraciones altas.

Las BXANH_BXQZ quedan determinadas con un 50% en el nodo 5. Muestra valores intermedios dentro de las tierras raras livianas a valores muy altos en las tierras raras pesadas.

CBB lo define principalmente el nodo 4 con un 68%. Tiene valores muy altos en La a concentraciones medias a Lu.

PDI aparece con un 38 y 48 % en los nodos 2 y 6. Presenta altas concentraciones en La y Ce en el nodo 2 y muy bajas en el nodo 6. Concentraciones muy bajas en el Nodo 6 y medias en nodo 2 para praseodimio y neodimio. Desde samario a lutecio sus concentraciones son bajas en ambos nodos.

PDA es determinada con un 81% por el nodo 2. Presenta valores muy altos a muy bajos desde La a Lu.

De igual modo, TO es descrita en un 92% por el nodo 2, exponiendo valores muy altos a muy bajos desde La a Lu.

En base a los resultados obtenidos en cada nodo, es posible definir cuáles son los valores que destacan por sus anomalías positivas. El arreglo de datos estudiado incluye una visualización grafica de los sondajes por cada unidad para evaluar si tienen alguna correlación espacial.

5.3.2.1 Distribución espacial

La ubicación de cada nodo en el espacio fue graficada con un software de modelamiento implícito, Leapfrog (Figuras 5.14 y 5.15 y Anexos G, H, I y J).

La ubicación de las muestras dentro de la mina para cada nodo son las siguientes:

El Nodo 1 se ubica en el sector noroeste y oeste de la Brecha Braden.

Nodo 2 tiene un cluster en el sector oeste de la pipa, con algunas muestras de sondaje en la zona noroeste.

Nodo 3, 4 y 5 se presenta en la parte oeste de la Brecha Braden.

Nodo 6 se reparte por el sector este, oeste, noroeste y suroeste de la Brecha Braden.

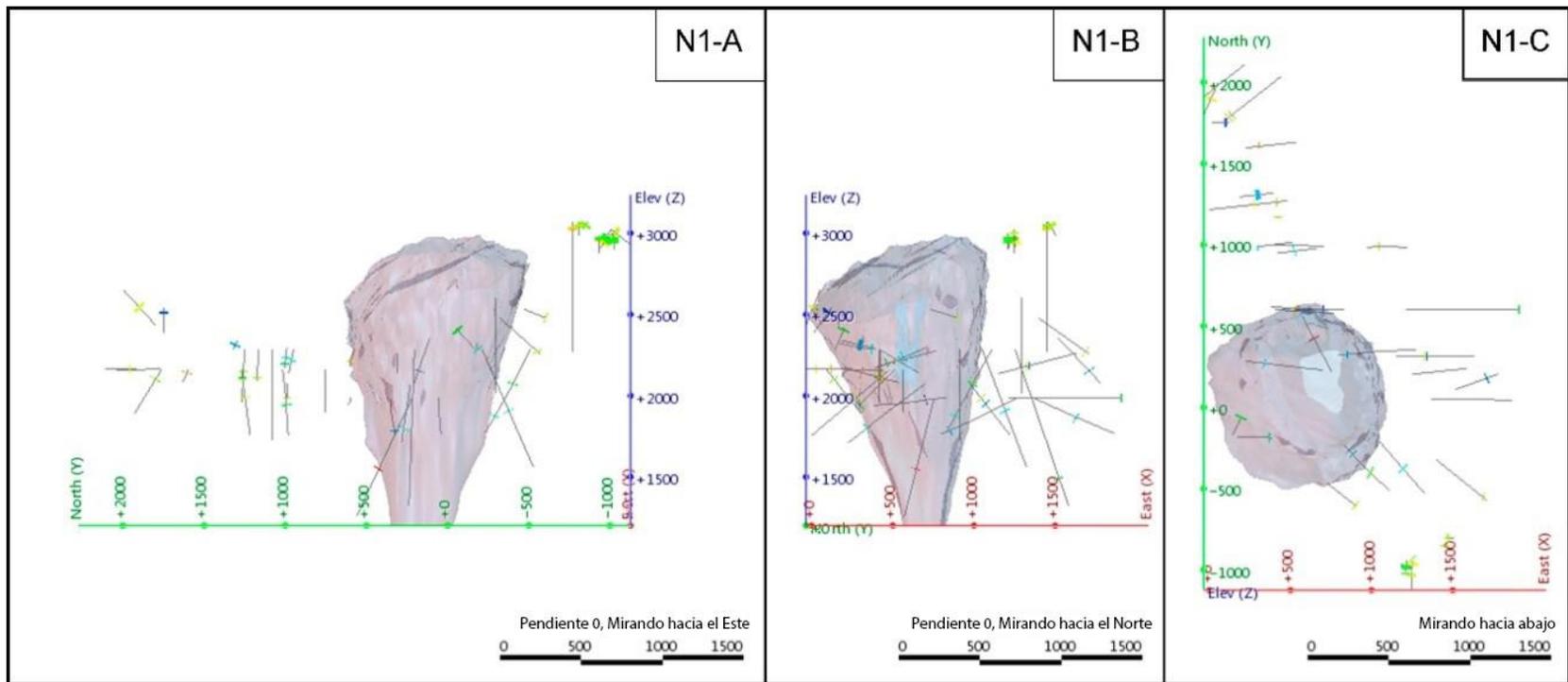


Figura 5.14. Distribución espacial de cada nodo de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta. Las líneas grises son los sondajes realizados que presentan datos químicos de REE; color azul, celeste, verde, amarillo, naranja, rojo y café representan el contenido de REE en la escala 0-100%, siendo el azul el valor más bajo y el rojo el más alto.

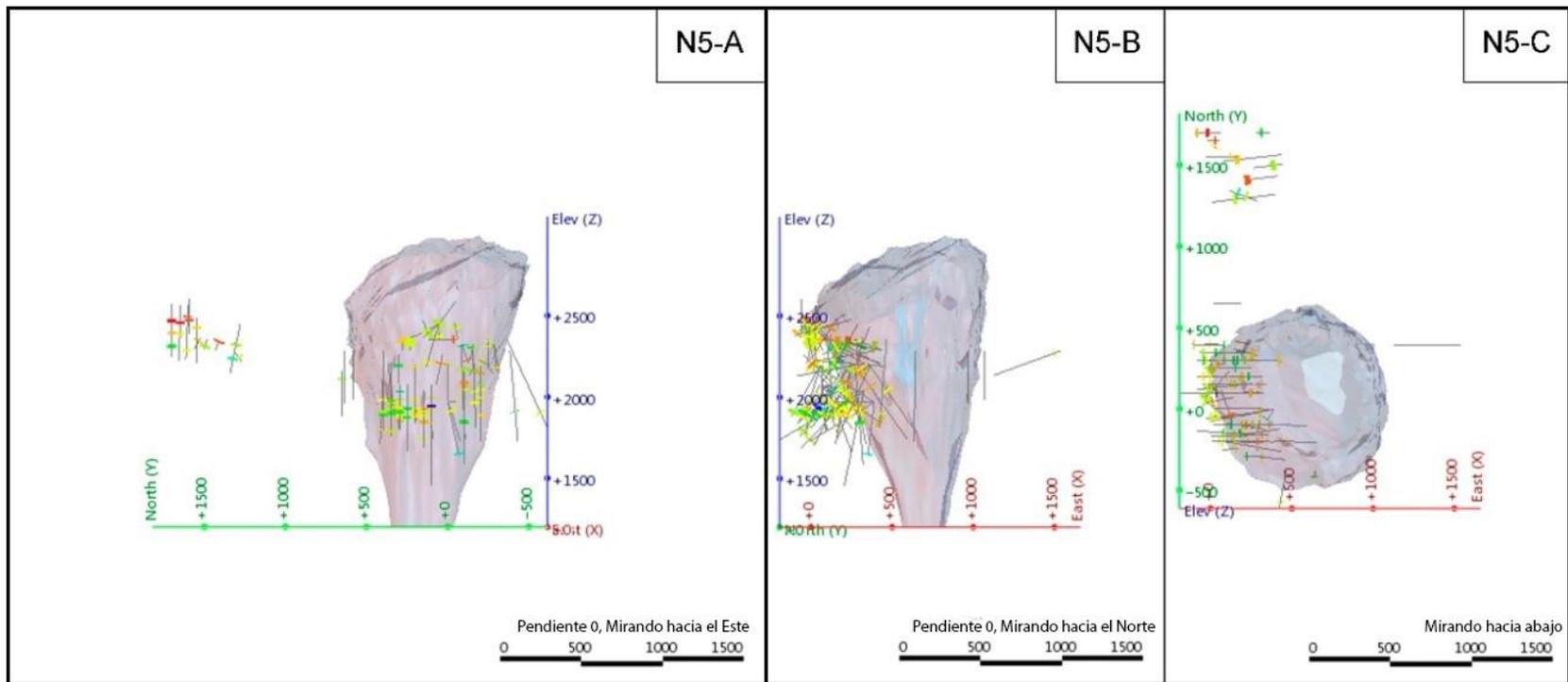
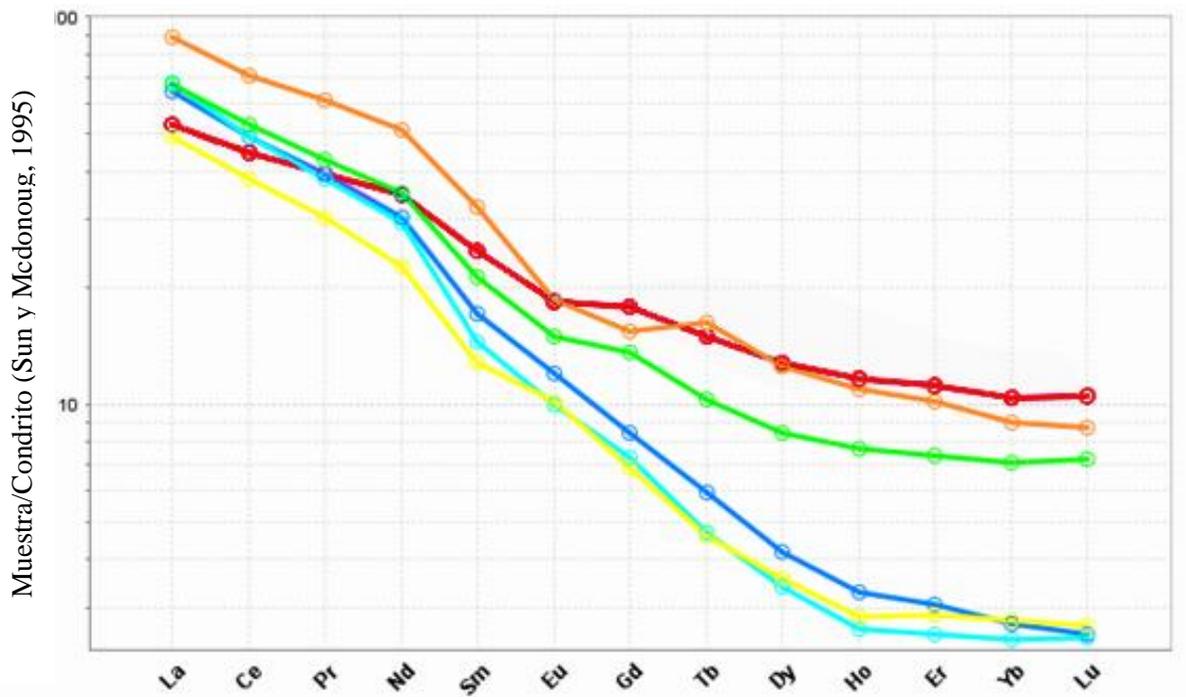


Figura 5.15. Distribución espacial de cada nodo de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta. Las líneas grises son los sondajes realizados que presentan datos químicos de REE; color azul, celeste, verde, amarillo, naranja, rojo y café representan el contenido de REE en la escala 0-100%, siendo el azul el valor más bajo y el rojo el más alto.

5.4 Diagrama de Condritos.

Los datos utilizados en el diagrama de condritos corresponden al promedio, según la litología, de la base geoquímica seleccionada. Con la abundancia de tierras raras normalizadas a condrito (Sun y McDonough, 1995), se observan patrones de curvas muy similares entre las litologías en las tierras raras livianas. Sin embargo, en las tierras raras pesadas las curvas ilustran la variabilidad en el contenido de HREE, observándose dos grupos, con concentraciones más altas para CMET, BXANH_BXQZ y CBB, y más bajas en PDA, PDI, TO (Figura 5.16).

LREE presentan entre 50 a 90 veces la abundancia condritica, mientras que los HREE hasta 10, según la litología.



Litología	Código Litológico	Color
CMET	1	●
TO	2	●
PDA	3	●
CCB	4	●
PDI	60	●
BXANH_BXQZ	70_71	●

Figura 5.16. Tierras raras normalizadas a la abundancia condritica con valores de Sun y McDonough (La: 0.24; Ce: 0.61; Pr: 0.09; Nd: 0.46; Pm: 0.26; Sm: 0.15; Eu: 0.06; Gd: 0.2; Tb: 0.04; Dy: 0.25; Ho: 0.05; Er: 0.16; Tm: 0.02; Yb: 0.16; Lu: 0.02).

5.5 Correlación de mineralogía con análisis químicos

Se trabajó con la base de datos *QEMSCAN* (*Quantitative Minerals by Scanning electron microscopy*), del área de Geometalurgia. Esta, es una técnica analítica configurada para medir variaciones mineralógicas basada en la geoquímica a escala microscópica.

Según la mineralogía avanzada *QEMSCAN*, los minerales que podrían presentar directamente o de forma accesoria las tierras raras dentro del yacimiento, son los siguientes: apatito, esfeno, monacita, sericita y los minerales de titanio.

Se ha realizado la matriz de correlación de REE y *QEMSCAN*, el Análisis de Componentes Principales (ACP) con la mineralogía *QEMSCAN* y las tierras raras, y la matriz de correlación entre la química del *ICP* con los elementos de tierras raras.

Las matrices de correlación se han realizado con el software *ioGAS*.

5.5.1 QEMSCAN

5.5.1.1 Matriz de correlación

La Tabla 5.11 expone la matriz de correlación con la mineralogía *QEMSCAN*. Se presenta correlación con los siguientes minerales:

Tabla 5.11 Matriz de correlación de tierras raras con análisis *QEMSCAN*.

Anfibolas	0.12	0.13	0.16	0.14	0.15	0.2	0.077	0.075	0.081	0.085	0.05	0.021	0.013	0.038
Anhidrita_Yeso	-0.2	-0.17	-0.12	-0.016	0.15	0.24	0.34	0.34	0.36	0.34	0.35	0.36	0.34	0.32
Apatita	0.0099	0.084	0.15	0.25	0.35	0.29	0.41	0.45	0.47	0.47	0.5	0.5	0.5	0.49
Arcillas	0.1	0.091	0.037	-0.033	-0.17	-0.37	-0.29	-0.3	-0.33	-0.32	-0.3	-0.3	-0.27	-0.25
Arcillas_Cu	-0.11	-0.11	-0.1	-0.098	-0.085	-0.21	-0.1	-0.075	-0.063	-0.08	-0.037	-0.12	-0.025	-0.014
Biotita	-0.19	-0.16	-0.077	0.016	0.23	0.4	0.36	0.4	0.46	0.46	0.45	0.41	0.43	0.43
Carbonatos	0.14	0.14	0.086	0.019	-0.13	-0.12	-0.2	-0.28	-0.29	-0.28	-0.26	-0.25	-0.24	-0.23
Clorita	-0.33	-0.31	-0.28	-0.19	-0.013	0.05	0.12	0.16	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18	0.14
Cuarzo	0.2	0.16	0.086	-0.036	-0.24	-0.44	-0.41	-0.41	-0.46	-0.45	-0.45	-0.42	-0.43	-0.43
Epidota	0.019	0.025	0.057	0.038	0.062	0.13	0.057	0.081	0.09	0.11	0.09	0.042	0.054	0.068
Esfeno	-0.11	-0.11	-0.07	-0.0027	0.1	0.24	0.2	0.22	0.25	0.21	0.21	0.17	0.18	0.15
Feldespato K	0.16	0.14	0.055	-0.015	-0.18	-0.29	-0.24	-0.3	-0.32	-0.29	-0.28	-0.25	-0.24	-0.23
Muscovita_Sericita	0.25	0.2	0.13	-0.028	-0.27	-0.42	-0.46	-0.48	-0.54	-0.52	-0.53	-0.51	-0.52	-0.49
Otros	0.13	0.13	0.13	0.11	0.047	0.045	-0.064	-0.055	-0.034	-0.015	-0.023	-0.035	-0.036	-0.023
Otros_Silicatos	0.12	0.12	0.13	0.087	0.037	0.061	-0.041	-0.026	-0.016	0.018	-0.00096	-0.04	-0.038	-0.0076
Piroxeno	-0.088	-0.068	-0.037	-0.03	0.032	0.088	0.034	0.053	0.085	0.094	0.086	0.026	0.048	0.055
Plagioclasa	-0.16	-0.12	-0.027	0.11	0.32	0.48	0.45	0.46	0.5	0.46	0.46	0.45	0.45	0.43
Turmalina	-0.027	-0.0073	-0.02	-0.0054	-0.015	-0.11	-0.0074	-0.025	-0.022	-0.015	0.012	0.035	0.044	0.055
Zircón	0.14	0.095	0.041	-0.045	-0.19	-0.26	-0.33	-0.32	-0.34	-0.38	-0.35	-0.42	-0.34	-0.34
Azurita/Malaquita	-0.38	-0.39	-0.42	-0.51	-0.79	-0.66	-0.75	-0.6	-0.44	-0.47	-0.44	-0.5	-0.26	-0.23
Bornita	-0.1	-0.1	-0.11	-0.098	-0.038	-0.0062	-0.0079	0.013	0.03	0.02	0.03	0.023	0.017	0.015
Calcopirita	0.045	0.011	-0.022	-0.036	-0.1	-0.1	-0.09	-0.076	-0.062	-0.046	-0.064	-0.075	-0.059	-0.051
Calcosina/Covelina	-0.15	-0.18	-0.22	-0.27	-0.3	-0.37	-0.37	-0.3	-0.32	-0.32	-0.3	-0.28	-0.3	-0.3
Calcosina/Digenita	0.17	0.22	0.28	0.34	0.26	0.098	0.11	0.14	0.17	0.18	0.21	0.17	0.23	0.21
Covelina	-0.057	-0.095	-0.14	-0.22	-0.29	-0.4	-0.43	-0.35	-0.42	-0.43	-0.42	-0.41	-0.42	-0.42
Crisocola	-0.49	-0.49	-0.5	-0.57	-0.73	-0.64	-0.64	-0.48	-0.33	-0.35	-0.33	-0.34	-0.16	-0.16
Cu Fe Silicato	-0.43	-0.44	-0.45	-0.52	-0.71	-0.6	-0.65	-0.51	-0.35	-0.38	-0.36	-0.4	-0.22	-0.2
Delafosita	-0.52	-0.49	-0.48	-0.43	-0.11	-0.085	-0.046	0.094	0.15	0.16	0.13	0.13	0.045	-0.014
Esfalerita	-0.18	-0.21	-0.27	-0.25	-0.27	-0.13	-0.28	-0.26	-0.23	-0.25	-0.23	-0.22	-0.24	-0.26
Molibdenita	0.078	0.049	0.021	-0.0065	-0.058	-0.055	-0.097	-0.073	-0.067	-0.05	-0.068	-0.073	-0.066	-0.055
Otros Mxs Cu	0.014	0.01	-0.01	-0.035	-0.068	-0.14	-0.1	-0.11	-0.11	-0.095	-0.11	-0.087	-0.1	-0.094
Otros Sulfuros	0.075	0.06	0.024	-0.016	-0.077	-0.11	-0.12	-0.12	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14	-0.12	-0.11
Oxidos Fe/Oxyhydroxidos	0.098	0.089	0.12	0.12	0.13	0.23	0.095	0.13	0.15	0.16	0.14	0.098	0.098	0.11
Pirita	-0.01	-0.014	-0.036	-0.049	-0.076	-0.14	-0.13	-0.095	-0.13	-0.13	-0.13	-0.11	-0.14	-0.15
Pirrotina	-0.048	-0.087	-0.14	-0.18	-0.23	-0.29	-0.3	-0.21	-0.28	-0.31	-0.29	-0.28	-0.3	-0.32
Sulfatos	-0.11	-0.13	-0.14	-0.15	-0.17	-0.14	-0.15	-0.17	-0.17	-0.2	-0.18	-0.22	-0.22	-0.22
Sulfuros Cu/As/Sb	0.039	0.037	-0.00084	-0.028	-0.085	-0.16	-0.12	-0.14	-0.14	-0.12	-0.12	-0.11	-0.11	-0.11
Ti Minerales	-0.2	-0.16	-0.12	-0.057	0.082	0.16	0.18	0.24	0.23	0.23	0.21	0.21	0.19	0.17

A continuación se presenta las correlaciones que sobresalen dentro de los análisis.

Anhidrita/Yeso: Se tiene una correlación baja con los siguientes elementos: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Apatita: Presenta una correlación moderada con Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Biotita: Presenta una correlación moderada con Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Muscovita/Sericita presenta una baja correlación con La y Ce; muy baja e inversa con el resto de las REE.

Plagioclasa: Muestra una relación moderada con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Calcosina/Digenita: Presenta una baja correlación con Ce, Pr, Nd y Sm; y muy baja con los elementos restantes.

El resto de los minerales y elementos presentan una muy baja a inversa correlación con los elementos de tierras raras.

Por tanto, se tiene una baja correlación de Muscovita/Sericita y Calcosina/Digenita en las LREE.

Para las tierras raras pesadas se tiene baja correlación con Anhidrita/yeso, moderada en apatito, biotita y plagioclasa.

Principalmente, los minerales que presentan concentraciones considerables de tierras raras en los depósitos de REE son los siguientes: Monacita (en Ce, La, Th, Nd) y xenotimo (en Y), pertenecientes al grupo de los fosfatos; bastnesita (para Ce, La e Y) en el grupo de los carbonatos; y loparita (La y Ce) dentro del grupo de los óxidos. Dado que la mineralogía *QEMSCAN* presenta minerales preestablecidos a analizar, y el yacimiento en estudio se relaciona especialmente a los sulfuros de cobre, es lógico no encontrar estos minerales que contienen REE en los análisis. Además, es importante indicar que el mineral esfeno no presenta correlaciones con LREE ni HREE, considerando que es conocido por sus relaciones con REE.

Finalmente, las REE no se relacionan directamente con los minerales de cobre.

5.5.1.2 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) busca reducir el número de variables determinando vectores propios cuyos valores propios describan la máxima varianza en todas las variables. El ACP permite describir y analizar las relaciones entre varias variables, jerarquizando la información en factores ortogonales. Este análisis se realizará para los minerales de la mineralogía *QEMSCAN* y los elementos de tierras raras.

A través del software estadístico *XLSTAT* se ha realizado el gráfico de sedimentación que muestra los valores propios asociados a un factor en orden descendiente en función del número del factor. Esta gráfica ayuda a evaluar visualmente cuáles factores explican la mayor parte de la variabilidad de los datos. La figura 5.17 presenta 34 factores, del cual los primeros cuatro factores explican la mayor parte de la variabilidad debido a que la línea comienza a ser recta después del factor 5. Los factores restantes explican una porción muy pequeña de la variabilidad y son probablemente de poca importancia.

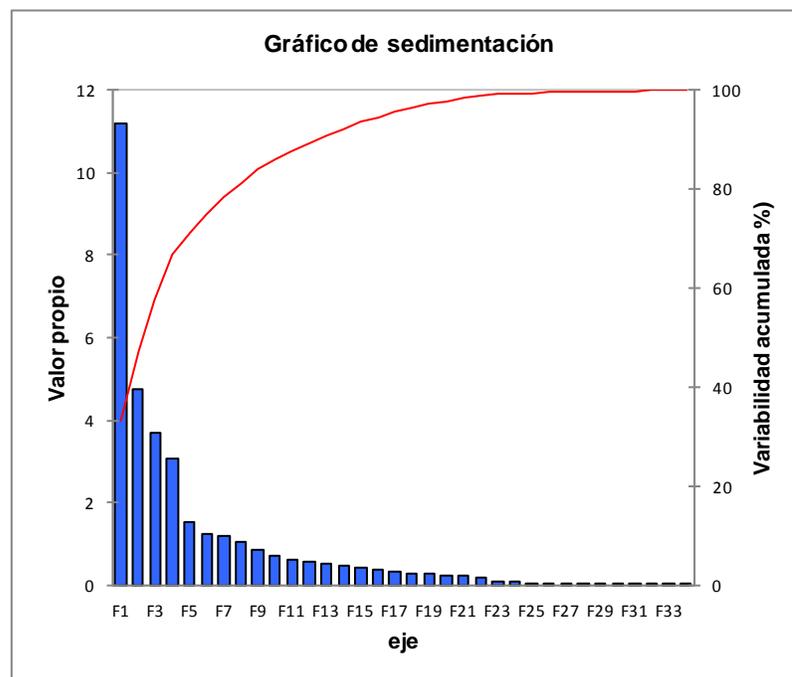


Figura 5.17. Gráfico de sedimentación.

Tenemos que el primer valor propio es igual a 11,22 y representa el 32,99% de la variabilidad total (Anexo K). Esto significa que si representamos los datos sobre un solo eje, aún así seremos capaces de ver un % de la variabilidad total de los datos.

Cada valor propio corresponde a un factor, y cada factor a una dimensión. Un factor es una combinación lineal de las variables iniciales, y todos los factores son no-correlacionados ($r = 0$). Los valores propios y los factores correspondientes están ordenados (en orden descendente) en función de la cantidad de la variabilidad inicial que representan (convertidos a %) (Anexo K).

La Figura 5.18 representa el *círculo de correlaciones*. Muestra una proyección de las variables iniciales en el espacio factorial. Los círculos de correlación muestran una proyección de la esfera de las variables en dos componentes, representadas por un punto dentro de un círculo unitario. Si la distancia entre la proyección de las variables es baja entonces su correlación es

alta, sin embargo, no siempre la proximidad en las proyecciones implica una proximidad en la esfera, a menos que las proyecciones se encuentren cerca de la circunferencia del círculo.

La figura 5.18 representa los factores F1 y F2 con un 47,02%.

Se observa que La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu están representados casi en un 100% por los factores F1 y F2, en la parte superior izquierda. Se tiene una alta correlación, dada la proximidad de los elementos, de La, Ce, Pr y Nd, representadas por F2. Además se observa las altas correlaciones de Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu, representadas por el F1.

No se observa que algún mineral esté representado en su totalidad por el círculo de correlaciones. Muscovita/sericita, feldespato K, carbonatos, arcillas, turmalina, piritita, calcopirita y molibdenita se representan en la izquierda superior del gráfico, con valores negativos de F1 y positivos a F2, inferiores a 0,5. Clorita, anhidrita/ yeso, plagioclasa, biotita, minerales de Ti, piroxeno, bornita, epidota, anfíboles y apatita se representan a la derecha inferior del círculo, con valores de F1 positivos e inferiores a 0,6, y valores negativos en F2. Esto significa que estos elementos no están representados totalmente por los ejes F1 y F2, por tanto no se puede correlacionar a las REE. Esta perspectiva estadística sugiere que las REE no presentan ocurrencia mayor con estos minerales.

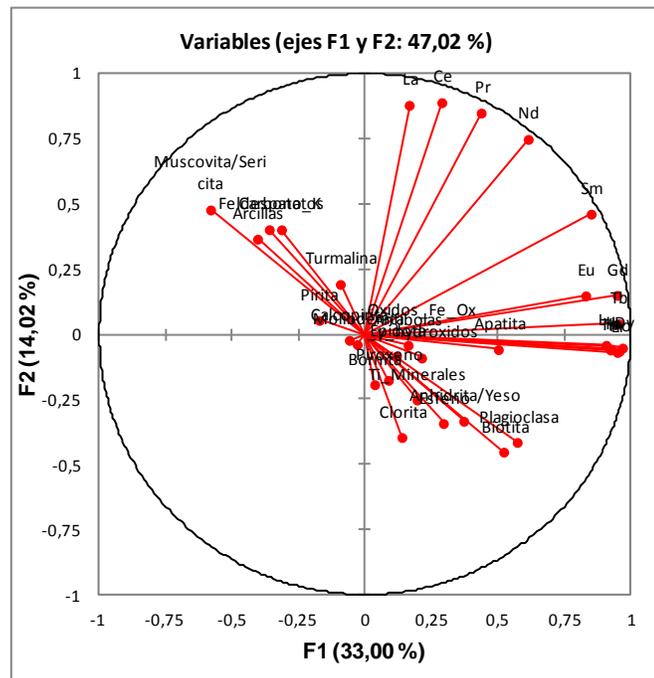


Figura 5.18. Círculo de correlación, ejes F1 y F2.

A continuación se presentan los círculos de correlación con los ejes F1-F3, F1-F4, F2-F3 (Figuras 5.19; 5.20 y 5.21).

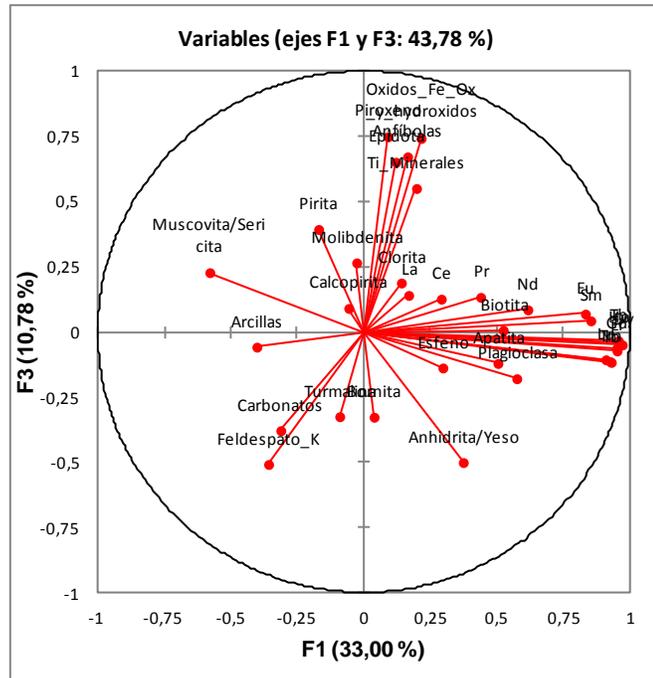


Figura 5.19. Círculo de correlación, ejes F1 y F3.

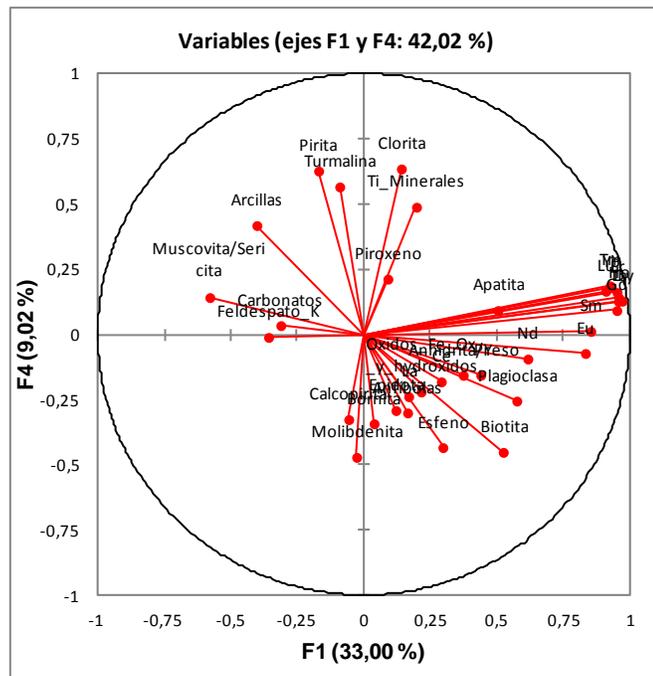


Figura 5.20. Círculo de correlación, ejes F1 y F4.

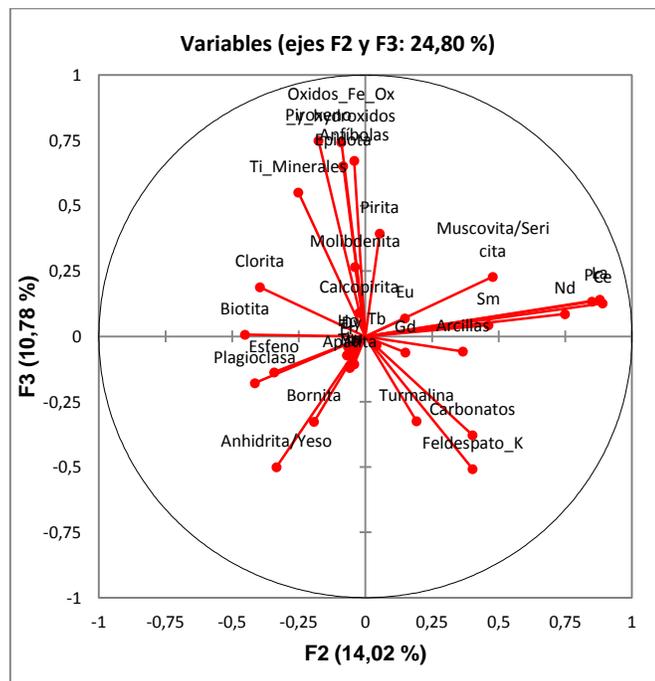


Figura 5.21. Círculo de correlación, ejes F2 y F3.

Las figuras 5.19, 5.20 y 5.21 permiten representar el 43,78%, 42,02% y 24,80%, respectivamente, de la varianza. En todos los gráficos se observan los elementos de tierras raras correlacionados entre sí, representados totalmente por las variables F1 y F2, mientras que los minerales *QEMSCAN* no se representan 100% con las variables F1, F2, F3 y F4, por lo que no se pueden correlacionar con los elementos de tierras raras.

5.5.2 ICP

Los siguientes elementos presentan la relación de los análisis ICP con tierras raras (Tabla 5.12 y 5.13):

Tabla 5.12. Matriz de correlación de tierras raras con análisis ICP.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SiO2	0,14	0,00	-0,13	-0,29	-0,54	-0,67	-0,62	-0,73	-0,73	-0,72	-0,71	-0,67	-0,67	-0,64
TiO2	-0,30	-0,19	-0,08	0,08	0,40	0,67	0,78	0,73	0,79	0,80	0,81	0,80	0,81	0,78
Al2O3	-0,35	-0,36	-0,34	-0,30	-0,15	0,17	0,20	0,05	0,12	0,13	0,15	0,14	0,17	0,15
Fe2O3	-0,14	-0,05	0,03	0,14	0,35	0,52	0,54	0,55	0,57	0,59	0,58	0,60	0,57	0,59
FeO	-0,24	-0,13	0,14	0,50	0,70	0,69	0,79	0,79	0,80	0,75	0,78	0,63	0,75	0,59
MnO	0,01	0,04	0,05	0,07	0,13	0,28	0,22	0,20	0,20	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23
MgO	-0,33	-0,24	-0,14	0,00	0,28	0,49	0,59	0,57	0,63	0,63	0,64	0,62	0,62	0,59
CaO	0,18	0,32	0,47	0,56	0,64	0,54	0,29	0,56	0,49	0,44	0,40	0,35	0,33	0,30
Na2O	0,00	-0,07	-0,11	-0,16	-0,28	-0,31	-0,35	-0,41	-0,42	-0,43	-0,42	-0,43	-0,41	-0,41
K2O	0,22	0,15	0,05	-0,06	-0,23	-0,39	-0,35	-0,35	-0,36	-0,35	-0,34	-0,32	-0,31	-0,29
P2O5	0,04	0,14	0,24	0,35	0,52	0,53	0,61	0,65	0,65	0,65	0,67	0,65	0,66	0,64
Cr2O3	-0,08	-0,06	-0,09	-0,04	-0,03	0,02	0,05	0,01	0,02	-0,04	-0,03	-0,02	-0,04	-0,08
SrO	-0,13	-0,09	0,01	0,12	0,33	0,49	0,49	0,49	0,53	0,52	0,52	0,48	0,49	0,48
BaO	0,40	0,36	0,27	0,14	-0,12	-0,27	-0,29	-0,33	-0,35	-0,31	-0,33	-0,30	-0,29	-0,26
Rb	0,05	0,02	-0,03	-0,05	-0,06	-0,07	0,03	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07
Sr	0,04	0,06	0,12	0,13	0,09	0,07	-0,13	-0,03	-0,07	-0,10	-0,12	-0,16	-0,16	-0,18
Y	0,05	0,20	0,33	0,49	0,75	0,83	0,92	0,95	0,98	0,98	0,98	0,96	0,96	0,94
Zr	0,40	0,48	0,54	0,53	0,44	0,16	0,36	0,32	0,29	0,32	0,31	0,34	0,34	0,36
Ba	0,30	0,20	0,08	-0,06	-0,31	-0,49	-0,46	-0,51	-0,54	-0,51	-0,52	-0,49	-0,48	-0,44
Pb	0,07	0,07	0,04	0,04	0,01	-0,03	0,01	-0,01	-0,03	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,02
Cs	-0,22	-0,20	-0,15	-0,08	0,09	0,23	0,29	0,28	0,32	0,32	0,33	0,28	0,32	0,28
U	0,38	0,35	0,29	0,22	0,14	0,04	0,13	0,06	0,05	0,08	0,09	0,12	0,13	0,16
Th	0,52	0,59	0,62	0,58	0,46	0,15	0,34	0,28	0,25	0,28	0,28	0,31	0,32	0,35
Hf	0,38	0,45	0,50	0,53	0,45	0,19	0,36	0,33	0,31	0,33	0,32	0,34	0,35	0,36
Sc	-0,37	-0,17	0,01	0,30	0,76	0,83	0,88	0,90	0,91	0,90	0,90	0,88	0,88	0,85
Ta	0,06	0,04	-0,01	-0,06	-0,16	-0,18	-0,27	-0,27	-0,30	-0,30	-0,30	-0,29	-0,30	-0,29
V	-0,39	-0,30	-0,19	-0,03	0,27	0,58	0,63	0,60	0,67	0,68	0,69	0,67	0,67	0,65
Cr	-0,13	-0,07	-0,04	0,05	0,16	0,25	0,35	0,30	0,33	0,34	0,33	0,37	0,33	0,34
Ni	-0,16	-0,11	-0,07	0,02	0,12	0,21	0,28	0,25	0,27	0,29	0,29	0,28	0,28	0,26
Co	-0,19	-0,16	-0,13	-0,09	-0,01	0,12	0,09	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10
Cu	-0,12	-0,09	-0,06	-0,05	0,05	0,06	0,18	0,15	0,16	0,18	0,16	0,17	0,14	0,16

Tabla 5.13. Matriz de correlación de tierras raras con análisis ICP.

Correlación	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Zn	0,05	0,04	0,01	0,01	-0,02	-0,06	-0,01	-0,04	-0,05	-0,02	-0,03	-0,01	-0,02	-0,01
Sn	0,09	0,11	0,11	0,12	0,19	0,17	0,31	0,27	0,26	0,28	0,30	0,32	0,31	0,35
W	0,08	0,05	-0,01	-0,08	-0,20	-0,16	-0,25	-0,25	-0,27	-0,29	-0,28	-0,28	-0,29	-0,28
Mo	-0,04	-0,04	-0,03	0,00	0,04	0,09	0,15	0,13	0,14	0,16	0,14	0,16	0,17	0,19
Ag	0,07	0,07	0,08	0,09	0,08	0,03	0,08	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07
As	-0,05	-0,06	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07	-0,09	-0,09	-0,07	-0,08	-0,06	-0,06	-0,07	-0,06
S	0,10	0,04	-0,09	-0,21	-0,23	-0,22	-0,18	-0,21	-0,18	-0,17	-0,16	-0,17	-0,17	-0,21
Ga	-0,20	-0,25	-0,30	-0,29	-0,23	0,07	0,15	-0,07	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,06
Nb	0,41	0,52	0,56	0,52	0,46	0,17	0,35	0,30	0,26	0,26	0,26	0,28	0,29	0,29
Ge	0,20	0,22	0,10	0,00	-0,16	-0,23	-0,18	-0,17	-0,19	-0,18	-0,18	-0,11	-0,17	-0,17
In	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	0,02	0,05	0,03	0,04	0,07	0,27	0,16	0,10	0,11	0,14	0,14	0,20	0,17	0,27
Tl	-0,03	-0,05	-0,06	-0,05	-0,06	-0,03	-0,02	-0,05	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02
Bi	-0,05	-0,08	-0,22	-0,31	-0,31	-0,28	-0,31	-0,31	-0,27	-0,28	-0,26	-0,25	-0,26	-0,23
Be	-0,33	-0,39	-0,42	-0,44	-0,44	-0,40	-0,08	-0,41	-0,38	-0,35	-0,34	-0,25	-0,29	-0,29
La	1,00	0,95	0,88	0,78	0,54	0,21	0,07	0,17	0,06	0,03	0,00	-0,02	-0,03	-0,02
Ce	0,95	1,00	0,96	0,88	0,69	0,34	0,19	0,33	0,21	0,17	0,14	0,13	0,10	0,11
Pr	0,88	0,96	1,00	0,96	0,82	0,47	0,29	0,47	0,35	0,31	0,27	0,24	0,22	0,22
Nd	0,78	0,88	0,96	1,00	0,91	0,59	0,44	0,62	0,51	0,47	0,44	0,41	0,38	0,37
Sm	0,54	0,69	0,82	0,91	1,00	0,81	0,70	0,86	0,78	0,75	0,71	0,68	0,66	0,64
Eu	0,21	0,34	0,47	0,59	0,81	1,00	0,85	0,87	0,87	0,84	0,82	0,79	0,78	0,75
Gd	0,07	0,19	0,29	0,44	0,70	0,85	1,00	0,90	0,93	0,93	0,93	0,92	0,93	0,91
Tb	0,17	0,33	0,47	0,62	0,86	0,87	0,90	1,00	0,97	0,96	0,94	0,92	0,91	0,88
Dy	0,06	0,21	0,35	0,51	0,78	0,87	0,93	0,97	1,00	0,99	0,98	0,96	0,96	0,93
Ho	0,03	0,17	0,31	0,47	0,75	0,84	0,93	0,96	0,99	1,00	0,99	0,97	0,97	0,96
Er	0,00	0,14	0,27	0,44	0,71	0,82	0,93	0,94	0,98	0,99	1,00	0,98	0,99	0,97
Tm	-0,02	0,13	0,24	0,41	0,68	0,79	0,92	0,92	0,96	0,97	0,98	1,00	0,98	0,97
Yb	-0,03	0,10	0,22	0,38	0,66	0,78	0,93	0,91	0,96	0,97	0,99	0,98	1,00	0,98
Lu	-0,02	0,11	0,22	0,37	0,64	0,75	0,91	0,88	0,93	0,96	0,97	0,97	0,98	1,00
Li	-0,43	-0,45	-0,44	-0,43	-0,36	0,00	0,63	-0,19	-0,09	-0,02	0,05	0,12	0,18	0,22
S	-0,06	0,04	0,07	0,15	0,21	-0,02	0,23	0,18	0,21	0,27	0,20	0,18	0,15	0,20
Au	0,33	0,27	0,23	0,25	0,22	-0,19	0,35	0,31	0,38	0,54	0,42	0,42	0,50	0,48

A continuación se presenta las correlaciones que se destacan dentro de los análisis.

TiO₂: Correlación moderada con Sm y alta con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Fe₂O₃: Relación moderada con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

FeO: Relación moderada con Nd, Eu, Tm y Lu. Alta con Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er e Yb.

MgO: Moderada con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

CaO: Presenta una correlación moderada con Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho y Er.

P₂O₅: Moderada con Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

SrO: Moderada con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

BaO: Moderada con La.

Y: Correlación moderada con Nd, alta con Sm, y muy alta de Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Zr: Relación moderada con La, Ce, Pr, Nd y Sm.

U: Baja correlación con La, Ce, Pr y Nd.

Th: Moderada con La, Ce, Pr, Nd y Sm.

Hf: Moderada con Ce, Pr, Nd y Sm.

Sc: Alta correlación con Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

V: Moderada con Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Nb: Moderada con La, Ce, Pr, Nd y Sm.

Li: Moderada con Gd.

Au: Moderada con Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

Además, se observa una correlación inversa entre TiO₂, Fe₂O₃, FeO, MgO, CaO, P₂O₅, SrO, Y, Zr, U, Th, Hf, Sc, V y SiO₂. Estas asociaciones de elementos mayores, menores y trazas sugieren una mineralogía propia de rocas máficas, probablemente CMET. Minerales ferromagnesianos contendrían elementos como Y, Sc y V, donde las REE se presentarían como elementos trazas en los mismos y/o en fosfatos. De lo anterior, se presume que las REE son de origen principalmente litológico.

El resto de los minerales y elementos presentan una baja a muy baja e inversa correlación con los elementos de tierras raras.

Finalmente, se tiene que todas o parte de las tierras raras livianas presentan una moderada correlación con Zr, Th y Nb.

Las HREE presenta correlaciones moderadas en Fe₂O₃, FeO, MgO, CaO, P₂O₅, SrO, V, Li y Au; y altas de TiO₂, Sc; y muy altas en Y, Sc.

Las REE no presentan correlaciones importantes con cobre.

En los depósitos de REE, las tierras raras se presentan como elementos trazas en minerales comunes formadores de roca, en los cuales reemplazan a los iones mayores. Estos elementos pueden encontrarse en inclusiones de apatito, zircón, alanita y otros minerales accesorios. Minerales como feldespato, biotita, esfeno y apatita generalmente tienden a concentrar las LREE, mientras que los piroxenos, anfíboles y granate, comúnmente concentran las HREE.

5.6 Alteración

La roca alterada dentro de un yacimiento contiene menores concentraciones de REE con respecto a la roca que hospeda la alteración (Schneider *et al.*, 1988). Asimismo, se reconoció que se tiene menor a mayor concentración dentro de las alteraciones silícicas, argílica y fílica, correspondientemente. Estas observaciones pueden explicarse en parte por: efectos de la hidrólisis, donde existe una pérdida de volumen, un aumento de cuarzo relativo que formará parte del producto residual; la disminución de la densidad que acompaña generalmente la argilización penetrativa; la incapacidad de los minerales secundarios a fijar todos los elementos de tierras raras liberados durante la alteración; y el efecto de lixiviación de la circulación recurrente de soluciones hidrotermales. Además, la anomalía original del europio tiende a desaparecer con el grado de alteración en aumento.

Todas las unidades litológicas pertenecientes al yacimiento pueden estar, en diferentes grados, sometidas a modificaciones en su composición química y mineralógica original, producto de la circulación de aguas de altas temperaturas. Este proceso es producto de la alteración hidrotermal de la roca, responsable de la formación de los minerales de interés económico y otros (referencia interna SGL-I-123/03, 2003).

Estudios del yacimiento postulan que el depósito es el resultado de al menos ocho eventos de deformación, siete etapas de mineralización sulfurada y siete de alteración (referencia interna SGL-I-123/03, 2003).

A continuación, se presentan las alteraciones que presentan las litologías en estudio:

CMET: Presenta alteración potásica, fuertemente biotitizada. Dentro de los minerales secundarios en la masa fundamental encontramos biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita y turmalina.

BXANH_BXQZ: Presenta alteración argílica dentro de la matriz y argílica sericítica dentro de los clastos.

CBB: Presenta una alteración filica y argílica que afecta a los clastos de las brechas y la matriz de la roca.

PDI: Afectada por alteración potásica representada por feldespato potásico y biotita y menores cantidades de anhidrita, cuarzo, clorita, albita, turmalina y sericita.

PDA: La alteración está determinada por una sericitización y argilización de los cristales de plagioclasa, cloritización y reemplazo por pirita de los minerales ferromagnesianos; silicificación y sericitización de la masa fundamental, la cual además presenta pirita y turmalina fina; ambas se encuentran diseminadas y en vetillas (Rojas, 2002). La alteración de la plagioclasa, parcial o total, es fundamentalmente a sericita, arcilla, calcita y biotita. Sericita y arcillas se concentran principalmente entre los planos de clivaje, zonación y fracturas. Calcita y biotita se encuentran finamente diseminadas o en agregados formando cúmulos dispersos. Además, se caracteriza por presentar una alteración potásica en el centro de esta zona gradando a asociaciones propilíticas hacia los márgenes del yacimiento. Afectada por alteración cuarzo-sericita, en forma subordinada a clorita.

TO (Diorita sewell): En las texturas porfídicas hacia los bordes del intrusivo principal se presenta una alteración potásica penetrativa (Ojeda *et al.*, 1980). Se reconoce una textura fanerítica en la parte central del cuerpo, a la cual se le asocia una fuerte alteración cuarzo-sericita-clorita, que se desarrolla a partir de halos de vetillas obliterando la textura y composición original de la roca (Faunes, 1981).

La alteración supérgena ocurre como un proceso gradual de infiltración de aguas desde la superficie que ha producido fenómenos de lixiviación y enriquecimiento secundario en la parte alta de la columna mineralizada, originando una cuenca de escurrimiento de aguas subterráneas, cuya base está constituida por el techo de sulfatos.

Como productos de estos fenómenos se desarrollan algunos minerales de alteración, tales como sericita, arcillas y cantidades subordinadas de minerales oxidados en los niveles superiores, generándose, en profundidad, enriquecimiento secundario de los minerales, obteniéndose como producto calcosina y en menor proporción covelina en pátinas sobre calcopirita, aumentando las leyes de Cu.

La sericita puede fijar las tierras raras livianas preferencialmente (Schneider, 1988). Dentro del yacimiento, la alteración sericítica no implica que la roca presente mineralización metálica. Schneider (1988) describe que las micas pueden tener concentraciones considerables de tierras

raras trivalentes. Además, generalmente las tierras raras pesadas son preferencialmente liberadas desde las rocas en la alteración argílica.

El mayor agotamiento de la REE en alteración argílica en comparación con alteración fílica puede estar correlacionada con la disminución de las posiciones de cationes adecuados en las facies ricas en minerales de arcilla (Schneider, 1988).

5.6.1 Análisis de unidades litológicas aledañas

Se realiza una comparación de la Formación Farellones (FF) y las litologías de estudio, junto a las rocas máficas de la Formación Farellones y el Complejo Máfico el Teniente, que presenta alteración. La Formación Farellones es la roca caja que hospeda la alteración. La Tabla 5.14 muestra el promedio de muestras en la Formación Farellones, y el promedio de muestras máficas de la misma formación.

Tabla 5.14. Formación Farellones, Kay and Kurtz (1995).

Elemento	Promedio (ppm)	
	FF	Rocas máficas FF
La	16,56	11,93
Ce	37,46	28,10
Nd	21,26	17,13
Sm	5,1	4,18
Eu	1,24	1,14
Tb	0,75	0,67
Yb	2,53	2,38
Lu	0,35	0,33

La figura 5.22 presenta la gráfica de las concentraciones de tierras raras de la Formación Farellones (color azul) junto a las concentraciones de las litologías del yacimiento (color verde); mientras que la figura 5.23 exhibe las concentraciones de tierras raras en las rocas máficas de la FF (color rojo) y las rocas máficas del yacimiento, el CMET (color gris).

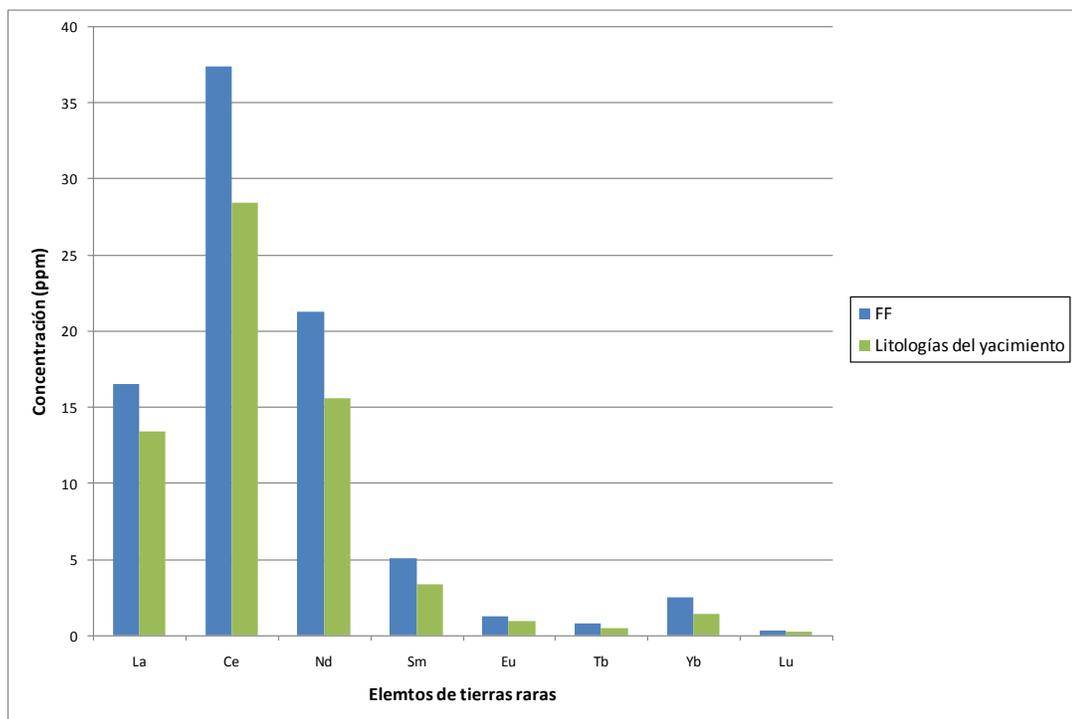


Figura 5.22. Concentraciones de REE en la Formación Farellones (FF) (color azul) y las litologías del yacimiento El Teniente. Teniente (CMET) (color verde).

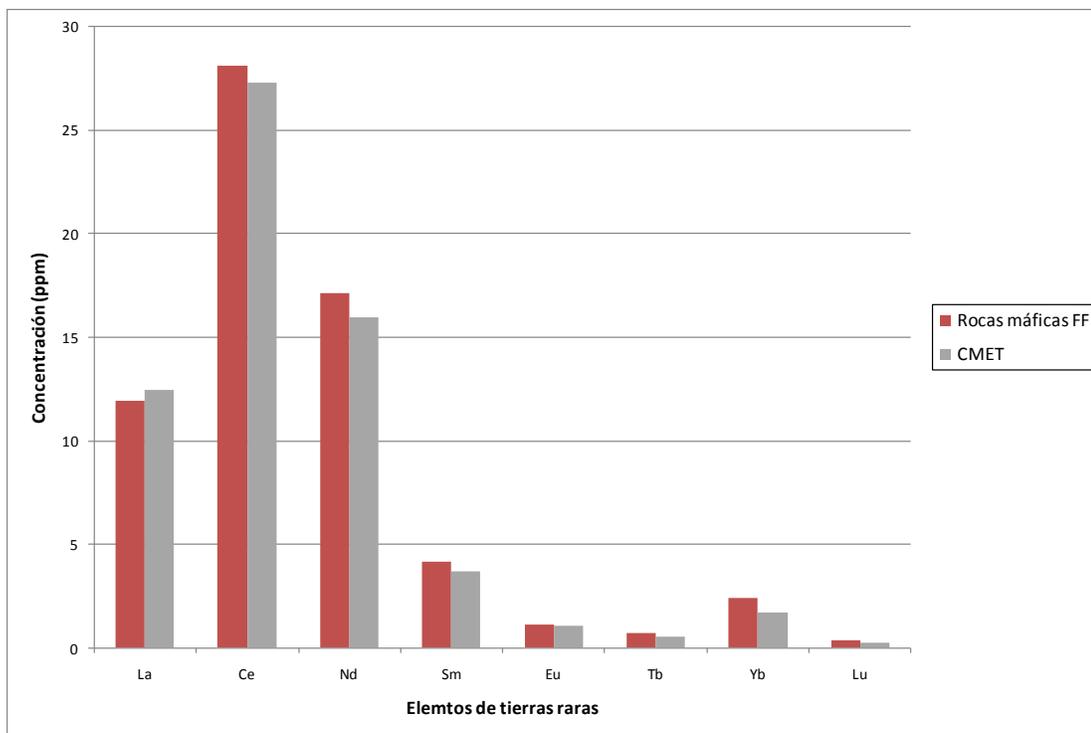


Figura 5.23. Concentraciones de REE en las rocas máficas de la Formación Farellones (FF) (color rojo) y del Complejo Máfico El Teniente (CMET) (color gris).

Se observa que la Formación Farellones presenta mayores concentraciones de REE que las rocas que forman el yacimiento El Teniente. De igual modo, las rocas máficas de la FF presentan ligeramente mayores concentraciones de REE que CMET, las rocas máficas del yacimiento. Por tanto, las rocas alteradas (unidades litológicas del yacimiento en estudio), junto a CMET, que presenta alteración potásica, presentan menores concentraciones de REE que las rocas no alteradas, pertenecientes a la formación Farellones.

5.7 Profundidad versus concentración

Se han graficado las concentraciones de ciertos elementos de REE con respecto a la profundidad correspondiente de cada muestra (Figuras 5.24; 5.25; 5.26 y 5.27). Se ha realizado la distribución normal estandarizada entre 0 y 1 para las concentraciones de cada elemento.

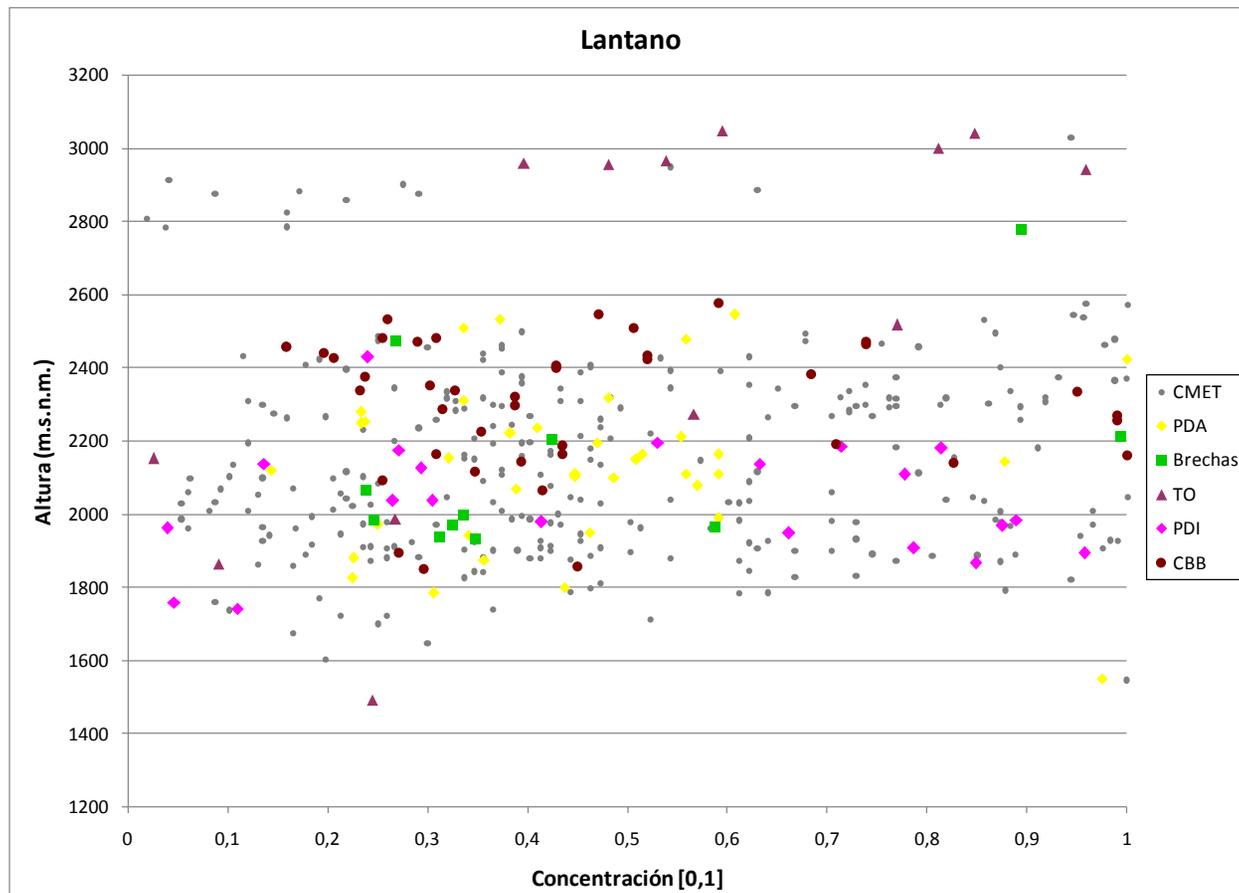


Figura 5.24. Concentración de lantano en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.

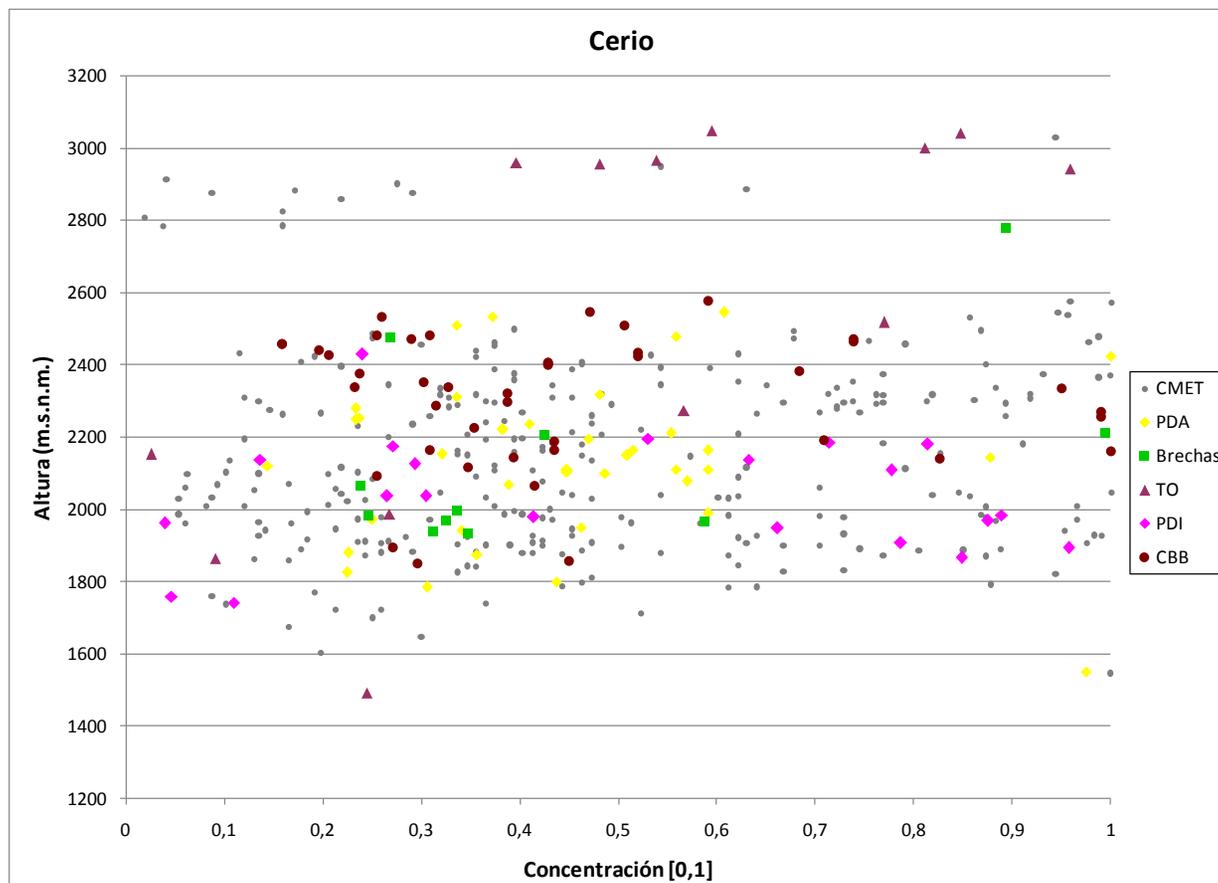


Figura 5.25. Concentración de cerio en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.

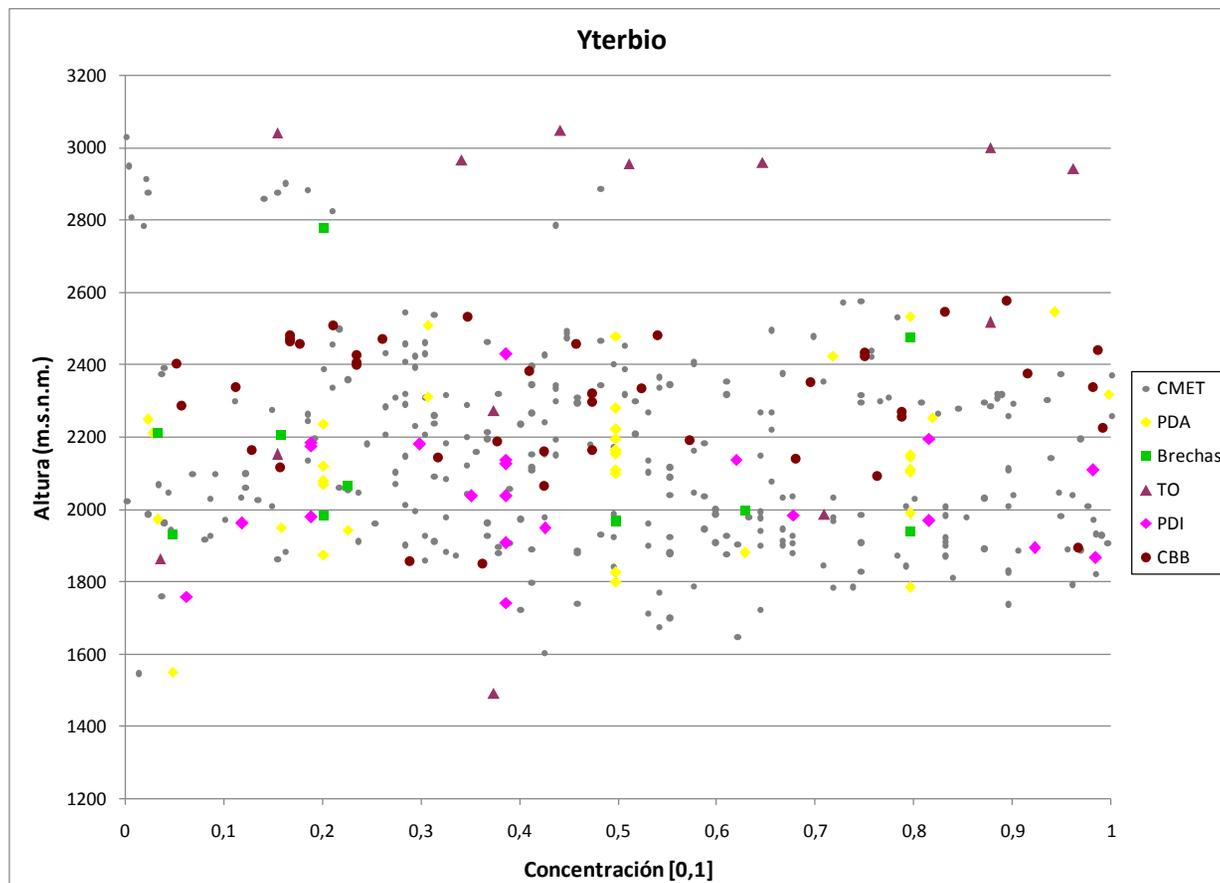


Figura 5.26. Concentración de yterbio en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.

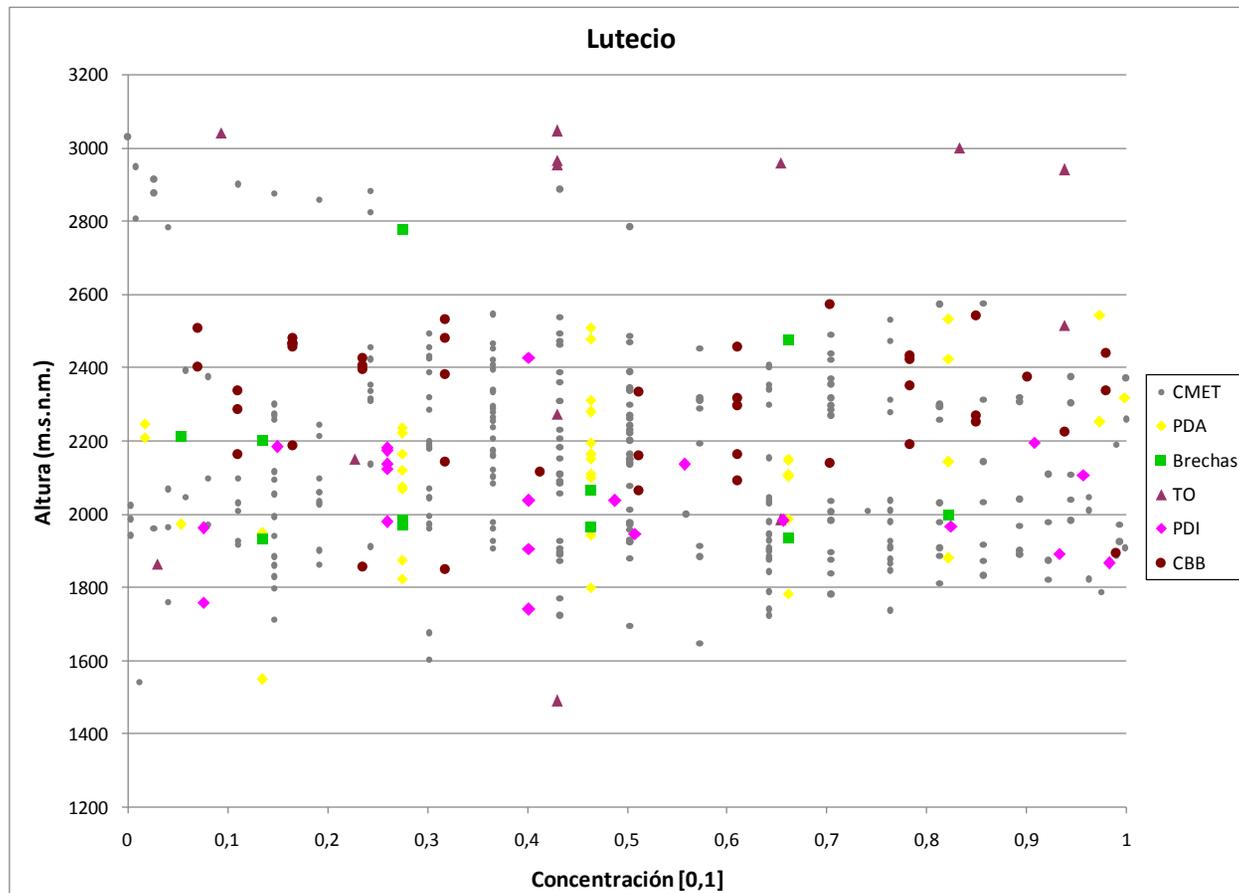


Figura 5.27. Concentración de lutecio en cada litología de estudio con respecto a la profundidad.

Dentro de La y Ce en la Tonalita, entre los 2900 y 3000 m.s.n.m., se tienen concentraciones igual o sobre la media.

CMET presenta en la mayoría de las muestras a 2800 m.s.n.m. bajas concentraciones.

Las concentraciones de CBB y PDA entre los 1800 y 2400 m.s.n.m. son igual o menor a la media.

Un gran conjunto de Brechas entre los 1800 y 2400 m.s.n.m. son inferiores al promedio de las concentraciones.

En Yb y Lu las concentraciones de CMET entre los 2800 m.s.n.m. son bajas.

Las muestras de Yb y Lu dentro de las litologías en estudio no presentan zonas preferenciales de concentraciones.

Las tierras raras se comportan solidariamente unas con otras entre LREE y HREE, es decir, cuando se tienen abundantes concentraciones de lantano, se tendrán altas concentraciones de cerio. De igual modo para Yb y Lu.

Se presenta un comportamiento errático a la profundidad en la mayoría de las concentraciones de cada litología.

No se observa enriquecimiento secundario remarcable.

5.8 Concentrados y Relaves

5.8.1 Concentrados

Se cuenta con la geoquímica de algunas muestras de concentrados luego del proceso de flotación (Tabla 5.15).

Tabla 5.15. Concentración de tierras raras en los concentrados de 3 muestras (en ppm).

Elemento	M1	M2	M3	Promedio
La	1.80	1.60	1.50	1.63
Ce	3.10	3.10	3.10	3.10
Pr	0.41	0.38	0.39	0.39
Nd	1.60	1.60	1.50	1.57
Sm	0.30	0.30	0.30	0.30
Eu	0.07	0.06	0.06	0.06
Gd	0.30	0.30	0.30	0.30
Tb	0.05	0.05	0.05	0.05
Dy	0.20	0.20	0.20	0.20
Ho	0.05	0.05	0.05	0.05
Er	0.10	0.05	0.10	0.08
Tm	0.03	0.03	0.03	0.03
Yb	0.10	0.05	0.10	0.08
Lu	0.02	0.02	0.02	0.02

La Figura 5.28 presenta la gráfica del promedio del concentrado (Tabla 5.15) junto a al promedio de las concentraciones de REE de las unidades en estudio (Anexo F).

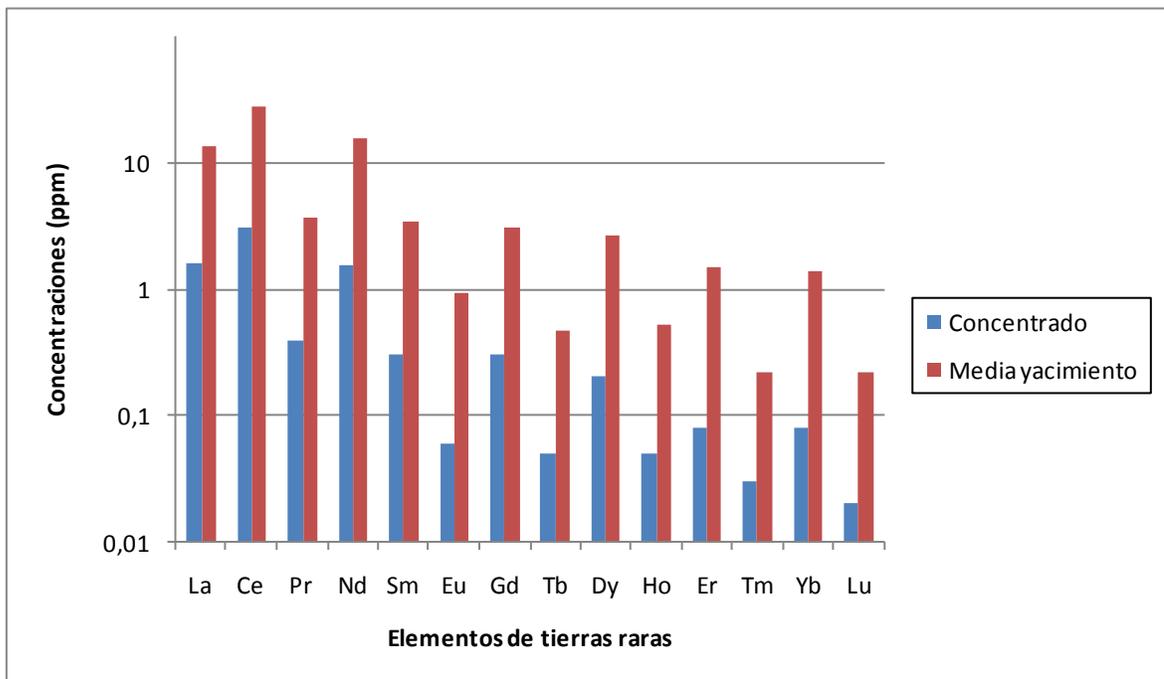


Figura 5.28. Concentraciones del promedio del concentrado tras el proceso de flotación (en azul) junto al promedio de REE de las unidades de estudio del yacimiento El Teniente. El eje Y está en escala logarítmica de base 10.

Los concentrados se encuentran deprimidos en REE, con respecto al promedio de REE que presenta el yacimiento. Presentan entre 7 a 15 veces menos que las concentraciones promedio dentro del yacimiento (Anexo F). Las LREE están un poco menos deprimidas (entre 7 a 11 veces) que las HREE (entre 9 a 15 veces).

El remanente de minerales que no queda en el concentrado se dirige a los relaves.

5.8.2 Relaves

Dentro del sector, aledaños al yacimiento, tenemos los siguientes relaves: Parrón, Cauquenes, Coligues, Barahona y el actual embalse Carén. El Parrón ha sufrido un aluvión, por lo que presenta mezclas de roca, no pertenecientes a la mina, por lo que no es conveniente utilizarlo en los análisis.

En este estudio se han realizado análisis de muestras del tranque Cauquenes, unos de los 3 botaderos de relaves que existen dentro del sector, siendo sus concentraciones expuestas en la Tabla 5.16.

Las muestras se realizaron en el sector central del tranque, con ocho puntos de extracción, en forma de rectángulo, con 250m de distancia entre cada muestra. El método utilizado para conocer las concentraciones de REE en el relave es espectrometría de emisión atómica (ICP).

Tabla 5.16. REE del Tranque Cauquenes. Fuente: Antonucci, 2014.

Elemento	Tranque Cauquenes		Unidades litológicas Yacimiento		Relave/Yacimiento
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación Estándar	
La	40,3	2,7	13,41	5,48	3,01
Ce	72,6	8,9	28,45	10,59	2,55
Pr	8,1	0,7	3,69	1,33	2,2
Nd	29,4	2,6	15,57	5,36	1,89
Eu	1,3	0,1	0,94	0,25	1,38
Dy	2,4	0,3	2,64	1,03	0,91
Ho	0,48	0,06	0,53	0,22	0,91
Er	1,3	0,2	1,49	0,61	0,87
Lu	0,2	0,02	0,22	0,09	0,91

Lantano, Cerio, Europio, Neodimio y Praseodimio presentan concentraciones superiores a los promedios que se tiene dentro de las litologías de la mina. Es destacable que algunos de estos elementos se presentan enriquecidos hasta 3 veces más que en el yacimiento.

Esto indica, que dentro del proceso metalúrgico, los desechos se van enriqueciendo de tierras raras o bien, existe un enriquecimiento supérgeno dentro de los relaves, de minerales que presentan REE.

6 DISCUSIÓN

Históricamente, Chile es un país que se ha enfocado en la minería del cobre, hierro, oro, plata, litio, yodo y potasio. La minería de las tierras raras es, hasta la fecha, es bastante desconocida, lo que hace que sea relevante comenzar a generar información y análisis respecto a estos elementos de transición.

Se desea conocer si el yacimiento El Teniente presenta tierras raras explotables en el mercado actual. Para recuperar estos elementos, que pueden terminar en crédito, se debe conocer su ubicación, en qué minerales ocurren y sus concentraciones. Dentro del procesamiento se debe pensar a cómo se pueden extraer, en qué parte del procesamiento se concentran, si se presentan en los concentrados o en los relaves, si vale la pena modificar el procesamiento para separar los minerales, según el costo que implique la operación.

En este trabajo se ha recopilado la base de datos de tierras raras de las litologías principales que presenta el yacimiento El Teniente.

Tenemos mayores concentraciones de tierras raras en las tierras raras livianas que las tierras raras pesadas.

Los análisis univariantes presentan que El Complejo Máfico presenta la menor dispersión de datos entre el 5 y 95%, mientras que presenta en todos los elementos una alta dispersión del 5 % superior e inferior de los datos. Esto es esperable ya que esta unidad es la que presenta la mayor cantidad de datos y además, corresponde a un Complejo constituido por tres subunidades.

Cuando el análisis químico es cercano al error asociado, aumentamos la incertidumbre de este. El caso más crítico en este estudio lo encontramos en las muestras de Tulio y Lutecio, donde ambas presentan un promedio de concentración de 0,22 ppm, con una desviación estándar de 0,09 y un error asociado de 0,04.

En las litologías de estudio existe una muy alta correlación entre los elementos La, Ce, Pr, Nd y Sm como también en Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. Las brechas de anhidrita y de cuarzo son las que presentan las correlaciones más dispares dentro de los elementos de REE.

A través de las RNA, los nodos 1, 3 y 5 son representados casi con un 98% por CMET. La, Ce, Pr y Nd sugiere una diferenciación en CMET, ya que sus concentraciones presentan variaciones siendo que deberían ser similares. Por otro lado, éstas presentan concentraciones altas en los tres nodos en las tierras raras pesadas. Para los nodos 3 y 5 la repartición de sondajes es similar, ubicándose en el sector oeste de la pipa, mientras que el nodo 1 presenta sus sondajes en el sector oeste de la pipa y en sector noroeste de esta. Por esta razón se sugieren 2 subunidades de CMET. Las diferencias entre los nodos 1, 3 y 5 pueden ser explicados por los múltiples episodios de brechización e intrusión que ha sido afectado el CMET, o por el hecho que CMET se compone de 3 litologías, gabros, diabasas y pórfidos basálticos.

Los diagramas normalizados a condritos muestran que todas las unidades consideradas presentan concentraciones similares a la razón concentración/condrito en las tierras raras livianas. Se observan dos fases mineralógicas para las HREE. La primera formada por PDA, PDI y TO en el Mioceno superior, y la segunda por CMET, BXANH_BXQZ y CBB en el Mioceno-Plioceno. Se sugiere la presencia de granate en PDA, PDI y TO dada la alta razón La/Yb entre las rocas. Se propone la presencia de plagioclasa y hornblenda para la segunda fase al tener una mayor concentración en tierras raras pesadas. El primer grupo presenta una fuente félsica, una fuente de granate que se segregó, mientras que el segundo grupo representa una fuente máfica sin granate en la fuente. Cabe destacar que el grupo de las brechas coincide con CMET, dado que estas presentan fragmentos de rocas máficas. Por tanto, aquí tenemos dos pulsos distantes que provienen de cámaras magmáticas distintas, con un magma que ha sufrido períodos magmáticos diferentes.

De acuerdo a todos los estudios realizados, análisis univariados, multivariados, la caracterización mineral a través de ICP y *QEMSCAN* las REE se presentan en los siguientes minerales: apatito, biotita y plagioclasa en las HREE y están asociadas a los siguientes elementos: Zr, Th y Nb en las LREE y Fe, Mg, Ca, P, Sr, V, Li, Au, Ti, Y y Sc en las HREE. Las REE no presentan correlaciones importantes con los minerales de cobre. El apatito por definición es de origen magmático, no se altera, es la huella fidedigna de la roca. El apatito presenta, generalmente, un aporte significativo en LREE, y en menor medida a HREE. Aquí lo encontramos correlacionado a las HREE. Pueden existir otros minerales que no tenemos dentro de los análisis *QEMSCAN* que estarían aportando a las LREE. Se carecen de análisis químicos que presentan directa relación con REE, tales como monacita, bastnasita, xenotimo, etc.

Las tierras raras se presentan en la corteza oceánica y continental a concentraciones inferiores a la centena de ppm en las LREE e inferiores a la decena de ppm en las HREE. Dentro del yacimiento las REE presentan concentraciones superiores a la decena de ppm en La, Ce y Pr; e inferior a la decena de ppm en Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. Los valores rentables en los depósitos explotables superan las centenas y unidades de mil ppm en las tierras raras livianas, mientras que superan las centenas de ppm en las tierras raras pesadas. Al comparar los resultados de concentraciones de REE con yacimientos que se explotan actualmente, Teniente presenta valores bajos para ser explotados.

Todas las unidades litológicas pertenecientes a la mina pueden estar, en diferentes grados, sometidas a modificaciones en su composición química y mineralógica original, producto de la circulación de aguas de altas temperaturas. Este proceso lleva a cabo la alteración hidrotermal de la roca, quien es la responsable de la formación de los minerales de interés económico y otros. Se compara la concentración de tierras raras en CMET, con las rocas máficas de la formación Farellones. Se tiene que las rocas alteradas de CMET presentan menores concentraciones de REE que la roca no alterada (F. Farellones). Se manifiesta de este modo la presencia de fluidos magmáticos-hidrotermales que han empobrecido la presencia de minerales con REE. Este resultado concuerda con Schneider (1988), donde las rocas alteradas tienen menores concentraciones de tierras raras que la roca caja.

Se presentan menores concentraciones de tierras raras en los concentrados con respecto a la roca del yacimiento, por lo que estos elementos no están asociados a los sulfuros de cobre, sino estarían asociados a los elementos trazas en los concentrados, posiblemente en impurezas propias del proceso. Estos minerales se presentan en minerales formadores de roca, accesorios o principales, como por ejemplo la biotita, mineral de alteración dentro CMET. Dichos minerales están asociados a la ganga, por lo tanto, terminarán en el relave.

Los relaves muestran mayores concentraciones de REE que los concentrados y las litologías de estudio. A lo largo de los años, los diferentes relaves han sido el resultado del residuo de los procesos de concentración mineral. Hasta la fecha, no se tiene un registro de los sectores de la mina que se han desechado en los relaves. De esta forma, no se puede reconocer cuál es el sector que produce mayor enriquecimiento de REE en los relaves.

Actualmente la compañía minera Valle Central, filial de la canadiense *Amerigo Resources*, posee los derechos para remover y procesar los relaves antiguos depositados en el Tranque Cauquenes. El método de recuperación de los elementos Cu y Mo es mediante flotación, por lo cual dado su producto no es posible concentrar otros elementos, incluyendo REE (según los resultados obtenidos, los concentrados de sulfuros se empobrecen en REE). Dado esto, sería interesante analizar el relave secundario generado, donde habría un fuerte enriquecimiento de REE.

Si hay concentraciones interesantes en aquellas zonas que se explotan, aquellas zonas de mena, que pasaran al chancado y molienda, con un tamaño bastante reducido a la extracción, y descartando la posibilidad de recuperación como crédito en el mismo proceso ya que los minerales asociados a REE no se presentan asociados a los minerales cupríferos, estos minerales no serán parte del concentrado sino formarán parte de la ganga, por lo cual partirá a los relaves, por tanto si existe un beneficio económico posible de REE, la potencialidad y el estudio de investigación se debe realizar en los relaves.

Existen una diversidad de minerales que se localizan en los relaves que presentan las siguientes características en común: son minerales pesados. Si tenemos elevadas concentraciones de minerales pesados que presenten REE en los relaves, puede existir un enriquecimiento que ocurre debido al proceso de transporte gravitacional, los cuales se pueden separar fácilmente en el procesamiento para la recuperación. Uno de los métodos posibles a realizar dentro de los relaves es el dragado y la concentración gravitacional, donde el agua es el constituyente esencial, ya que separa los minerales por su peso específico. De esta forma se separaran los minerales pesados y además se pueden separar los magnéticos y no magnéticos, como la magnetita.

Dentro de un yacimiento de cobre, la extracción de tierras raras no tendrá el mismo beneficio que el cobre, principalmente por la cantidad, pero entregará un extra a la compañía minera. Se debe considerar que el proceso más costoso y energético ya se ha realizado, el proceso de molienda y chancado. Actualmente no hay un proceso industrial que permita procesar un relave completo, pero si se puede considerar dentro de la “Mitigación y control ambiental”.

Si hay minerales pesados que se puedan vender dentro del mercado como resultado del esfuerzo de la “mitigación y control ambiental”, el dinero que se genere ayudará a pagar el proceso, desarrollándose un negocio sustentable. Desde el punto de vista económico, lo más probable es que hacer esto no genere ganancias exorbitantes, esto no estará dentro del ámbito de negocios del cobre, pero dentro de las normativas y exigencias para los relaves, lo ideal es procesarlos, limpiarlos y asegurar que el residuo sea absolutamente inerte. Desde el momento que el costo de separación del mineral ya está realizado, recuperando las menas de cobre y molibdeno, significa que todo el material disgregado y separado da una oportunidad de estudiar la mineralogía de los relaves y determinar cuáles minerales presentan un potencial económico, entre ellos no solo los minerales de REE, sino también otros como titanita, rutilo, ilmenita, minerales de Fe (Magnetita), etc.

Hay minerales contenedores de REE que son pesados y susceptibles de recuperación, junto con muchos otros minerales pesados dentro del sistema a través de un procesamiento simple de trabajo en los relaves. Se pudiera explorar la viabilidad de analizar el cálculo de las concentraciones en los relaves y a partir de esto, potencialmente evaluar la concentración y venta de REE. Por tanto, se debe evaluar la factibilidad económica y potencial que tienen las REE en los relaves.

Se recomienda, por lo tanto, y de acuerdo a las concentraciones de REE en los relaves, estudiar la posibilidad de recuperar los minerales pesados dentro de estos, tales como aquellos que son contenedores de REE.

7 CONCLUSIONES

1.-Las concentraciones de La, Ce, Pr y Nd son acotadas y semejantes en todas las unidades litológicas. Los elementos Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb y Lu, presentan dos poblaciones de datos, siendo CMET la que presenta las concentraciones más altas. Las concentraciones más elevadas de tierras raras las encontramos en La, Ce y Nd dentro de las 6 unidades definidas, en el orden de las decenas de ppm. El mayor valor de concentraciones promedio lo presenta cerio en las Brechas de anhidrita y de cuarzo con 43,45ppm.

2.-Rangos de concentraciones entre máficos (CMET) y félsicos (PDA, PDI y TO) varían según LREE y HREE. Lantano, cerio, praseodimio y neodimio presentan concentraciones similares entre máficos y félsicos, mientras que samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, yterbio y lutecio presentan mayores concentraciones en máficos que félsicos, siendo en algunos casos cuatro veces mayor.

3.-Las tierras raras livianas y pesadas están estrechamente correlacionadas entre sí, respectivamente. Las relaciones entre los elementos Nd, Sm, Eu, Gd y Tb se entremezclan entre LREE y HREE en ciertas litologías.

4.-Las Redes Neuronales revelan que las concentraciones de REE en CMET presentan subunidades en el sector oeste y este de la pipa. Los resultados obtenidos reafirman que el CMET está compuesto por distintas litologías máficas básicas.

5.-Existen dos pulsos magmáticos distantes que provienen de cámaras magmáticas distintas, con un magma que ha sufrido períodos magmáticos diferentes. Esto se afirma dado que tenemos dos fases mineralógicas en las HREE. La del Mioceno superior compuesta por PDA, PDI y TO con una fuente de granate y la del Mioceno-Plioceno integrada por CMET, BXANH_BXQZ y CBB con la presencia de plagioclasa y horblenda.

6.-Los principales minerales analizados que aportan tierras raras pesadas son apatito, biotita y plagioclasa. Las REE no presentan relación con sulfuros de cobre.

7.-Las rocas del yacimiento presentan menores concentraciones de REE con respecto a las rocas de la Formación Farellones, dada la presencia de fluidos hidrotermales.

8.-Las tierras raras no evidencian tendencias en sus concentraciones con la profundidad del yacimiento.

9.-Se tiene un empobrecimiento de REE en los concentrados entre 7 a 11 veces menos en las LREE y 9 a 15 veces menos en las HREE.

10.- Se presenta un enriquecimiento en las concentraciones de tierras raras en los relaves, con concentraciones lantano, cerio y praseodimio de hasta 3 veces mayores que en el yacimiento.

11.-Los análisis realizados demuestran que las concentraciones de REE son bajas en el yacimiento para pensar en su explotación.

Si bien en el yacimiento no existen concentraciones de REE que sean susceptibles de crédito o beneficio económico, no se descarta la posibilidad de analizar la presencia de estos elementos en minerales pesados dentro de los relaves que potencialmente podrían ser recuperados.

8 RECOMENDACIONES

Dado que la base de datos realizada contiene toda la información química que posee la unidad geológica del yacimiento, se pueden realizar estudios para conocer la composición mineralógica de cada sondaje a través de elementos mayores y menores. Estos minerales se pueden correlacionar según alteración y distribución siendo una ayuda para el mapeo geológico.

El 70% de las muestras disponibles corresponden a CMET, en el sector oeste del yacimiento. Se recomienda realizar análisis químicos de elementos menores en TO, PDA y PDI, considerando que estas unidades litológicas son relevantes en cuanto a volumen explotado.

Para un estudio más preciso de REE se recomienda la incorporación de minerales portadores de tierras raras a la biblioteca *QEMSCAN*, tales como monacita, bastnasita, xenotimo.

Establecer dentro de los relaves de dónde proviene el material de desecho dentro de los diferentes sectores productivos. De esta forma se podrá controlar de qué lugar proceden elementos enriquecidos que podrían ser económicamente interesantes.

Realizar un estudio mineralógico detallado de los relaves.

BIBLIOGRAFIA

Alguacil, F., 1997. Procesos de separación de las tierras raras. *Revista de Metalurgia*, Vol 33, N° 3.

Alvarez L., 1990. Perfil de alteración y mineralización supérgena en el yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, 99p. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas. Antofagasta, Chile.

Antonucci, V. 2104. Elementos traza en tranque Cauquenes, Codelco-Chile.

Arévalo, A., Floody, R. y Olivares, A. 1998. Modelo geometalúrgico. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo. *Informe inédito* (GL-133/98), 76 p. CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología, Alto Colón, Chile.

Arredondo, C. 1994. Distribución, caracterización y génesis de los cuerpos de brecha en el sector central-este del Yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 99 p.

Barazangi, M. y Isacks, B., 1976. Spatial distribution of earthwakes and subduction of the Nazcaplate beneath South America. *Geology*, Vol. 4, p. 686 - 692.

Boqué, R. 2004. El límite de detección de un método analítico. Técnicas de laboratorio.

Burgos, L. 2002. Petrografía y geoquímica de la diabasa y diques basálticos que constituyen las “andesitas de la mina” en el Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, 108 p.

Calas, G. 2014. Les minéraux et ressources en terres rares et métaux rares sur la planète. UPMC.

Cannell, J. 2004. El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile. Ph.D. Thesis (Unpublished), University of Tasmania, 317 p.

Cannell, J., Cooke, D.R., Walshe, J.L. y Stein, H., 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit. *Economic Geology* (100): 979-1003.

Camus, F. 1975. Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wallrock alteration. *Economic Geology*, Vol.70, N°8, p. 1.341 - 1.372.

Castor, S. B., y Hedrick, J. B. 2006. Rare earth elements. (m. a. Society for mining, Ed.) *Industrial minerals*. Volumen N° 7, p. 769-792.

Charrier, R. 1973. Geología Regional de la provincia de O'Higgins y Colchagua. Publicación INEN, N°7, p. 1-69. Santiago, Chile.

Charrier, R. 1981. Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinean-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution. *Zentral blatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, Stuttgart 1 (3/4). p. 344-355.

Charrier, R. y Munizaga, F. 1979. Edades K-Ar de volcanitas cenozoicas del sector cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34°15' L.S.). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 7: 41-51.

Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Spichiger, S. y Zapatta, F. 1994. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las formaciones Coya- Machalí y Abanico, entre los 33°50' y 35° S, Cordillera Principal Chilena. In Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas 2, 1316-1319. Concepción.

Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher, C., Mark, N., Zapatta, F., Mckenna, M. y Novacek, N. 1996. New Evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35° S, Central Chile). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 9, N° 5-6, p. 393-422.

Codelco-Chile. 2011. El Teniente, minera del futuro.

Cuadra, P. 1986. Geocronología K-Ar del Yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*, N°27, p. 3-26.

De la Hoz, M. 2012. Las Tierras Raras: elementos claves del Siglo XXI. *Revista cuatrimestral de del instituto de Bio y Geociencias*. Año II, N°2.

Falcón, M. y Rivera, O. 1998. Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000. Informe inédito, 108 p. Vicepresidencia de exploraciones y asociaciones mineras, CODELCO Chile. Santiago, Chile.

Faunes, A. 1981. Caracterización de la mineralogía metálica y de alteración en un sector del stock tonalítico del Yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 175 p.

Floody, R. y Huete, C. 1998. Potencial Distrito Teniente. Informe Inédito. Gerencia de Exploraciones, CODELCO-Chile. 49 p.

Fritzke, B., 1994. Growing Ceil Structures - A Self.-Organizing Network for Unsupervising and Supervising Learning. *Neural Networks*, y. 7, n° 9, 1441-1460.

Fuenzalida H; 1967. Clima, en Geografía económica de Chile, Corporación de Fomento a la Producción p. 99-151, Santiago.

- García Bilbao P. 2015.** Las tierras raras: encrucijada de conflictos.
- GMRD-SGL-P-030, 2015.** Procedimientos, selección y validación y extracción de muestras geometalúrgicas.
- Godoy, E. 1993.** Geología del Área entre los ríos Claro del Maipo y Cachapoal, Volumen I: Texto y Mapas, 67 p. Informe Final Proyecto CODELCO y SERNAGEOMIN.
- Godoy, E. y Lara, L. 1994.** Segmentación Estructural Andina a los 33°-34° latitud Sur: Nuevos datos en la Cordillera Principal. Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas, Vol. 2, p. 1344-1348. Concepción.
- Godoy, E., Yañez, G., and Vera, E., 1999.** Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean central Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*, 306, p. 217-236.
- Gómez, R. 2001.** Geología de las unidades volcanogénicas cenozoicas del área industrial de la mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 143 p
- Hitschfeld M.E., 2006.** Petrografía y geoquímica de los intrusivos leucocráticos del sector sur este del yacimiento El Teniente. VI Región, Chile. Memoria de Título, Universidad de Concepción, Departamento ciencias de la tierra, 154p.
- Howell, F. y Molloy, J. 1960.** Geology of the Braden Orebody, Chile. *Economic Geology*, Vol. 55, p. 863-905.
- Kay, S. y Kurtz, A. 1995.** Magmatic and Tectonic Characterization of the El Teniente Region. Informe Inédito, 180 p. CODELCO-Chile, División El Teniente.
- Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. y Munizaga, F. 1991.** Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28-33°S), in Harmon, R., Rapela, C., eds., *Andean magmatism and its tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 265*, p. 113-137.
- Klöhn, C. 1960.** Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Boletín N°8, 95 p. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R. y Farrar, E. 1997.** Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 16. p. 145-162.
- Lacassie, JP. 2003.** Estudio de la proveniencia sedimentaria de los complejos metamórficos de los Andes Patagónicos (46°-51° Lat. S) mediante la aplicación de redes neuronales e isótopos

estables. Tesis (Doctor en Ciencias, mención Geología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 204 p.

Lacassie, JP, Ruiz Del Solar, J, Roser, B, Ortiz, E. 2004. Discovering geochemical patterns using artificial neural networks: Kando River case study *GeoscienceAfrica*. 620–621 p.

Lacassie, J.P., Ruiz Del Solar, J. (2010). Application of artificial neural networks to the geochemical study of an impacted fluvial system. *IEEE Int Joint Conf. on Neural Networks- Barcelona, España*, 8 p.

Lindgren, W. 1917. Report on the Rancagua Mines. Informe inédito, 53 p. Braden Copper Company. Sewell, Chile.

Lindgren, W. y Bastin, E. 1922. The Geology of the Braden Mine, Rancagua, Chile. *Economic Geology*, vol.17, p.75- 79.

López, M. 2016. Tierras raras, un millonario hallazgo. *Revista Capital*.

McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The Composition of the Earth; *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-253.

Maksaev, V., Munizaga, F., Mc Williams, M., Thiele, K., Arévalo, A., Zúñiga, P. y Floody, R. 2001. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the El Teniente Porphyry Copper Deposit. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón, Chile. Extended Abstracts (CD-ROM) p. 496- 499.

Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J. y Zentilli, M. 2004. New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from UPb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. *Society of Economic Geologists, Special Publication 11*, p.15-54.

Munizaga, F., Maksaev, V., Mathur, R., Ruiz, J., McWilliams, M. y Thiele, K. 2002. Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. 2002 Denver Annual Meeting (October 27-30, 2002), paper N° 152-5.

Neary, C.R., Highley, D.E, 1984. The Economic Importance of the Rare Earth Elements. Chapter 12. *Developments in Geochemistry. Volumen 2*, p. 423-466.

Ojeda, J., Hernández, E., Ossandón, G., Enrione, A. y Mestre, A. 1980. El Pórfido Cuprífero El Teniente. Informe Inédito, 76 p. CODELCO-Chile, División El Teniente.

Ossandón, G. 1974. Petrología y alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 189 p.

Palacios C.M. et al, 1986. Behaviour of rare elements during hidrothermal alteration at the Buena Esperanza copper-silver deposit, northern Chile. *Earth and Planetary Science Letters*. p 208-216.

Rivera, O. y Falcón, F. 2000. Secuencias de relleno de cuencas volcano-tectónicas transversales Oligoceno-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33° 45'-34° 30' S). IX° Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, v.1, pp. 819-823.

Rivera, O. y Cembrano, J. 2000. Modelo de Formación de Cuencas Volcano-Tectónicas en Zonas de Transferencia Oblicuas a la Cadena Andina: El Caso de las Cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central y su Relación con Estructuras NWW-NW (33° 00'-34° 30'S). Congreso Geológico Chileno N° 9, 2001. Actas, Vol. 1, p. 631-636. Puerto Varas.

Riveros, M. 1991. Geología del Pórfido Latítico del sector sur del Yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 164 p.

Rojas, A. 2002. Petrografía y geoquímica del Pórfido Teniente, ubicado en el sector norte del Yacimiento El Teniente, Provincia de Cachapoal, VI Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, 133 p.

Rollinson H., 1993. Using Geochemical Data. Capítulo 4.

Rowlatt Justin, 2014. El secreto poder de las tierras raras. Servicio mundial de la BBC.

Schneider H. J., C. M. Palacios, 1988. Relationship between alterations, are Earth Element distribution, and mineralization of the Murgul Copper Deposit, Northeastern Turkey. Economic Geology Vol. 83, p. 1238-1246.

SGL-I-123/03. 2003. Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003. Superintendencia Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile. Alto Colón, Chile.

Sillitoe, R.H.; Perelló, J. 2005. Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, Metallogeny, exploration, and discovery. In Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume (Hedenquist, J.W.; Thompson, J.F.H.; Goldfarb, R.; Richards, J.; editors). Society of Economic Geologists: 845-890. Littleton, Colorado, USA.

Skewes, M. 1999. Notas petrográficas sobre algunas brechas de El Teniente. *Informe inédito*, 34 p. CODELCO-Chile División El Teniente, Superintendencia Geología. Alto Colón, Chile.

Skewes, M. 2000. Rocas ígneas del depósito de cobre El Teniente, Chile Informe Inédito. Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile. 94 p.

Skewes, M. y Arévalo, A. 1997. Andesitas de la Mina, El Teniente: VIII. Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. 2, p. 1.162-1.164. Antofagasta.

Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P. y Stern, Ch. 2002. The Giant El Teniente Breccia Deposit: Hypogene Copper, Distribution and Emplacement. *Society of Economic Geologists*. Special Publication N° 9. Capítulo 14: 299-332 pp. Boulder.

Skewes, A., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P. y Stern, C.R., 2005. The El Teniente megabreccia deposit, the world's largest copper deposit. En: Porter, T.M. (ed.), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide, v. 1, p. 88-113.

Stern, C.R. y Skewes, A., 2005. Origin of giant Miocene and Pliocene Cu-Mo deposits in central Chile: role of ridge subduction, decreased subduction angle, and long-lived, batholith size, open-system magma chambers. En: Porter, T.M. (ed.), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide, v. 1, p. 65-82.

Suárez, M. y Tapia, F. 2012. Interaprendizaje de estadística básica. Universidad Técnica del Norte. Ecuador

Sun, S. y McDonough, W. F. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* Vol. 120, p. 223-253.

Taylor S. R. y McLennan S. M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.

Thiele, R. 1980. Hoja Santiago. Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000. N° 39, 51 p. Santiago.

U.S. Geological Survey, 2005. Mineral Commodity Summaries.

U.S. Geological Survey, 2011. Mineral Commodity Summaries.

U.S. Geological Survey, 2015. Mineral Commodity Summaries.

Valenzuela, R. 2003. Mineralización sulfurada hipógena de cobre en el sector central del Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo*. 80 p. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

Villalobos, J. 1975. Alteración hidrotermal de las andesitas del Yacimiento El Teniente, Chile. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 125 p.

Walker, A.J., Cross, S.S., Harrison, R.F. (1999). Visualisation of biomedical datasets using growing cell structure networks: a novel diagnostic classification technique. *The Lancet*, vol. 354, pp. 1518–1521.

Watanabe, Y, 2014. Challenges for the production of Heavy Rare Earth Elements from Hard Rocks. Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour. Vol. 20, N°2.

White y Klein, 2013. Geochemistry. Capítulo 11.

Zygmunt M y Balcerzak M. 2000. Analytical Spectroscopy Library, Volume 10, Pág. 341-349

ANEXOS

Anexo A. Lista cronológica del descubrimiento de las distintas tierras raras junto a su radio iónico estimado (Alguacil, 1997).

Año	Elemento	Descubridor	Radio iónico
1794	Itrio	Gadolin	0.90
1814	Cerio	Berzelius	1.01
1839	Lantano	Mosander	1.05
1843	Erbio	Mosander	0.89
1878	Terbio	Mosander	0.92
1878	Yterbio	Marígnac	0.87
1879	Samario	de Boisbaudran	0.96
1879	Escandio	Nilson	0.75
1879	Holmio	Cleve	0.90
1879	Tulio	Cleve	0.88
1880	Gadolinio	Marígnac	0.94
1885	Praseodimio	von Welsbach	1.00
1885	Neodimio	von Welsbach	0.98
1886	Disprosio	de Boisbaudran	0.91
1896	Europio	Demarcay	0.95
1907	Lutecio	Urbain	0.86
1945	Prometio	Glendenin/Marinsky	0.97

Anexo B. Características físico-químicas de los elementos de tierras raras (Fuente: Flahaut J., 1969. Les Éléments des terres rares. Paris, Masson et Cie).

N° atómico	Elemento	Símbolo	Masa atómica	Electro-negatividad	Radio iónico (nanómetro)			
					Ln 2+ coord.6	Ln 3+ coord.6	Ln 4+ coord.6	Ln metal coord.6
21	escandio	Sc	44.96	1.20		0.068		0.164
39	itrio	Y	89.91	1.11		0.089		0.180
57	lantano	La	138.91	1.08		0.106		0.188
58	cerio	Ce	140.12	1.06		0.103	0.092	0.183
59	praseodimio	Pr	140.91	1.07		0.101	0.090	0.183
60	neodimio	Nd	144.24	1.07		0.100		0.182
61	prometio	Pm	[147]	[1,07]		[0,098]		[0,181]
62	samario	Sm	150.35	1.07	0.111	0.096		0.180
63	europio	Eu	151.96	1.01	1.109	0.095		0.204
64	gadolino	Gd	157.25	1.11		0.094		0.180
65	terbio	Tb	158.92	1.10		0.092	0.084	0.178
66	disprosio	Dy	162.50	1.10		0.091		0.177
67	holmio	Ho	164.93	1.10		0.089		0.177
68	erbio	Er	167.26	1.11		0.088		0.176
69	tulio	Tm	168.93	1.11	0.094	0.087		0.175
70	iterbio	Yb	173.04	1.06	0.093	0.086		0.194
71	lutecio	Lu	174.96	1.20		0.085		0.173

Anexo C. Tamaño, grado-% de óxidos de tierras raras (REEO) y tipo de depósito, con producción o potencial.

Depósito o Distrito	País	Tamaño, † REEO	Grado, % REEO	Tipo de depósito	Producción reciente	Referencia
Bayan Obo	China	48.000.000	6	Ferrífero	Si	Drew et al., 1990
Araxá	Brazil	8.100.000	1,8	Carbonatita Laterita	No	Morteani et al., 1996
Mountain Pass	Estados Unidos	1.800.000	8,9	Carbonatita	Si	Castor y Nason, 2004
Mount Weld	Australia	1.700.000	11,2	Carbonatita Laterita	No	Mariano 1989b
Dubbo	Australia	700.000	0,86	Trachita	No	Australian Zirconia Ltd., 2000
Mrima Hill	Kenia	300.000	5	Carbonatita	No	Orris y Grauch, 2002
Nolan's Bore	Australia	150.000	4	Vetas	No	Anon, 2003
Xunwu y Longnan	China	No conocido	0.05–0.2	Laterita	Si	Wu et al., 1996
Lovozero	Rusia	No conocido	0,01	Peralcalina	Si	Hedrick et al., 1997
Maoniuping	China	No conocido	2	Vetas	Si	Wu et al., 1996
Weishan	China	No conocido	1,6	Vetas	Si	Wu et al., 1996
Aktyus	Kirguistán	No conocido	0,25	No conocido	Si	Geological Survey de Kirguistán, 2004
Eneabba	Australia	No conocido	0,001	Placer	Si	Griffiths, 1984

Anexo D. Toneladas métricas de óxido de tierras raras por año de producción en los países productores.

País	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995	1997	1999	2001	2003*
	Toneladas métricas de REO										
Australia	8,328	10,304	7,047	7,15	3,85	1,65	110	0	0	0	0
Brazil	2,891	2,174	2,383	1,377	719	270	103	0	0	0	0
China	na†	8,5	15,1	25,22	16,15	22,1	48	53	70	80,6	90
India	2,2	2,2	2,2	2,365	2,2	2,5	2,75	2,75	2,7	2,7	2,7
Kyrgyzstan	na	na	na	696	721	0	na	na	6,115	3,8	na
Malasia	601	3,869	1,618	1,7	1,093	224	452	422	631	281	450
Mozambique	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sudáfrica	0	0	660	660	237	237	0	0	0	0	0
Sri Lanka	165	110	110	110	110	110	110	110	120	0	0
Tailandia	164	459	270	368	229	127	0	7	0	0	0
Rusia	na	na	na	7,626	6,138	4,468	2	2	2	2	2
Estados Unidos	17,083	13,428	11,1	20,787	16,465	17,754	22,2	10	5	5	0
Zaire	6	0	53	96	66	11	5	0	0	0	0
Total	31,439	41,047	40,541	68,155	47,978	49,449	75,73	68,288	86,566	94,381	95,15

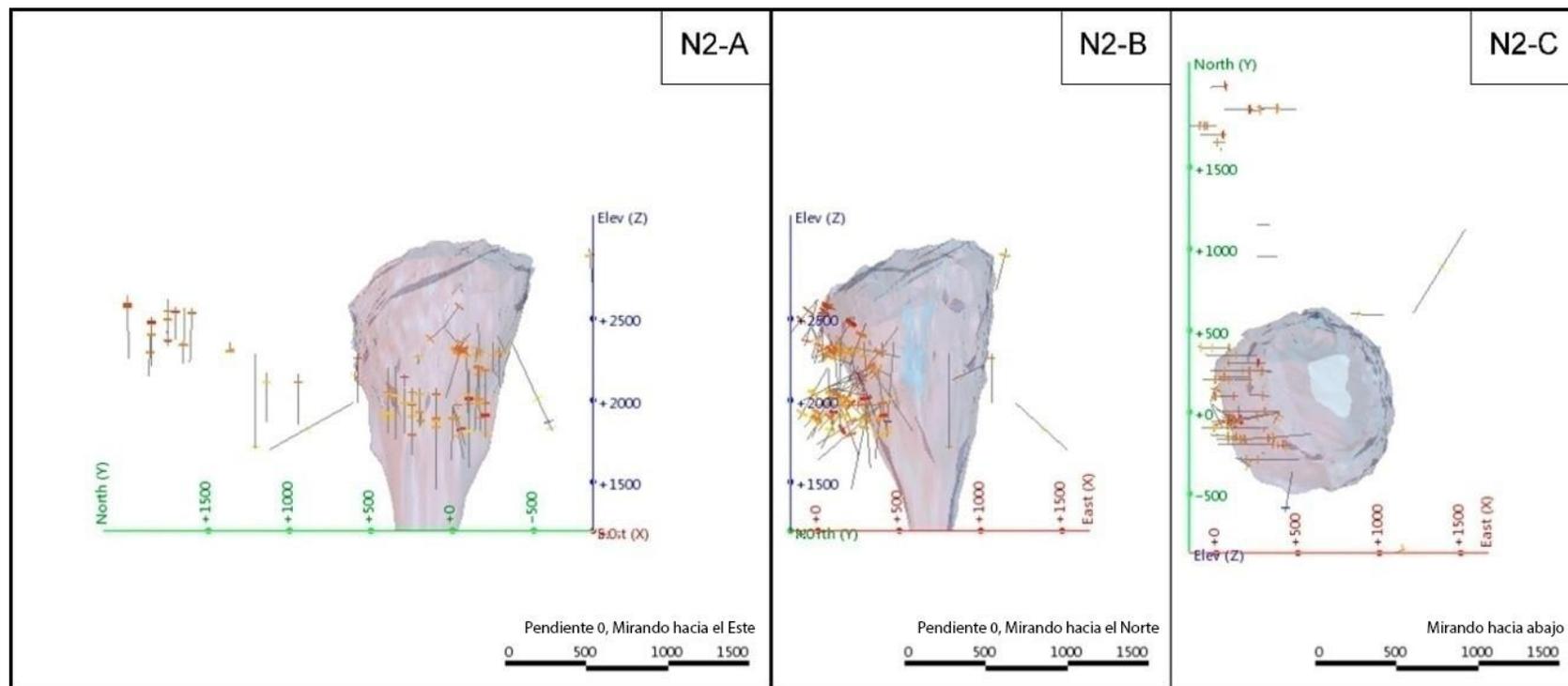
Anexo E. Límite de detección a través de ICP. Laboratorios Actlabs, Canadá.

REE	L.D. (ppm)
Ce	0.1
Pr	0.1
Nd	0.1
Sm	0.1
Eu	0.05
Gd	0.1
Tb	0.1
Dy	0.1
Ho	0.1
Er	0.1
Tm	0.05
Yb	0.1
Lu	0.04

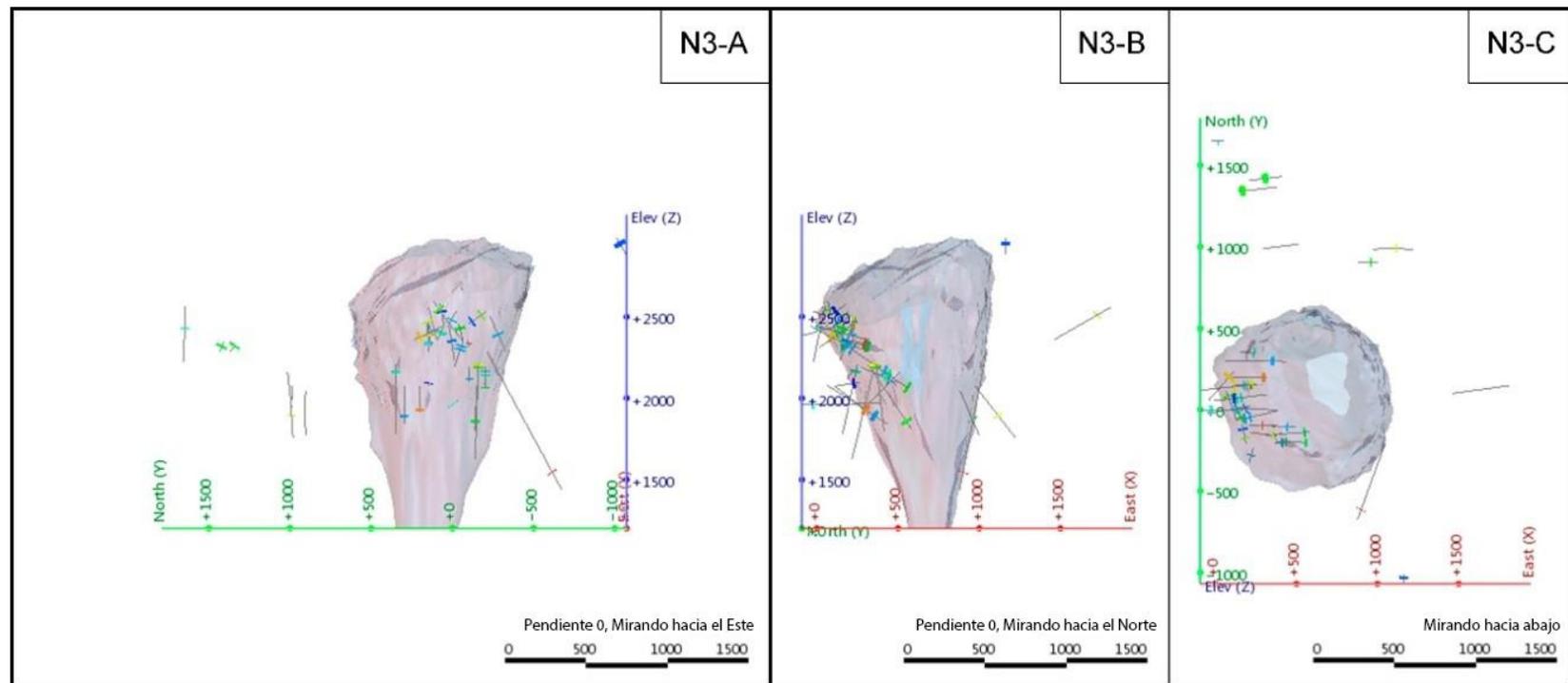
Anexo F. Tabla de Estadígrafos del promedio de las litologías en estudio para cada elemento de tierras raras, en ppm.

Elemento	Media	Mínimo	1°Cuartil	2°Cuartil	3°Cuartil	Máximo	Moda	Desviación Estándar	Rango	Rango Intercuartil
La	13.41	4.20	10.60	12.40	15.10	62.30	14.90	5.48	58.10	4.50
Ce	28.45	3.77	23.40	26.80	31.53	148.00	26.50	10.59	144.23	8.13
Pr	3.69	1.24	3.13	3.54	4.09	21.52	3.40	1.33	20.28	0.96
Nd	15.57	1.62	13.50	15.10	17.20	89.20	16.10	5.36	87.58	3.70
Sm	3.38	0.98	2.80	3.44	3.88	16.70	2.80	1.12	15.72	1.08
Eu	0.94	0.18	0.78	0.98	1.10	1.94	1.10	0.25	1.76	0.32
Gd	3.10	0.60	2.49	3.34	3.73	6.26	1.40	1.01	5.66	1.24
Tb	0.46	0.05	0.35	0.50	0.57	1.48	0.20	0.17	1.43	0.22
Dy	2.64	0.40	2.02	2.93	3.31	6.05	0.70	1.03	5.65	1.29
Ho	0.53	0.05	0.40	0.59	0.66	1.20	0.10	0.22	1.15	0.26
Er	1.49	0.20	1.11	1.65	1.90	3.40	0.40	0.61	3.20	0.79
Tm	0.22	0.03	0.17	0.24	0.28	0.48	0.25	0.09	0.46	0.11
Yb	1.39	0.16	1.07	1.52	1.76	3.13	0.40	0.57	2.97	0.69
Lu	0.22	0.02	0.16	0.24	0.28	0.48	0.26	0.09	0.46	0.12

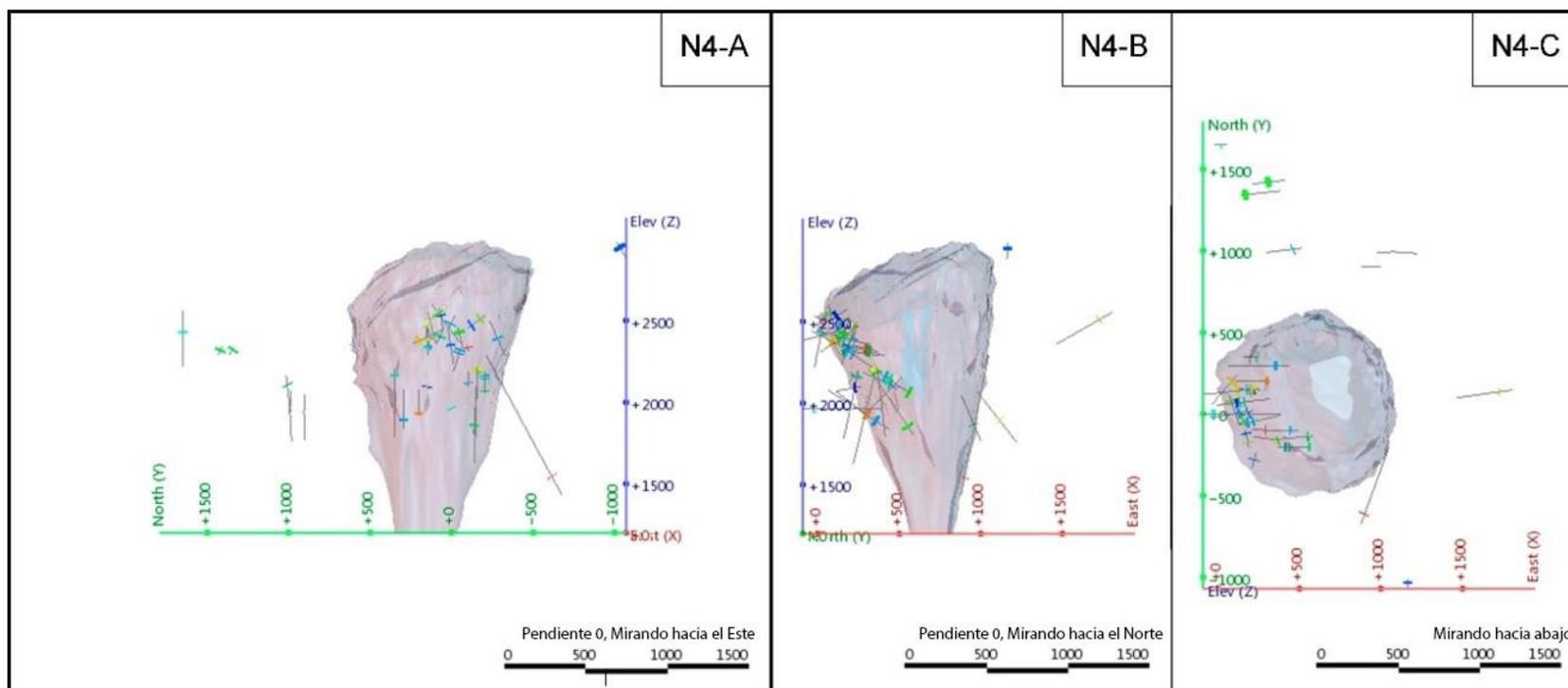
Anexo G. Distribución espacial del nodo 2 de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta.



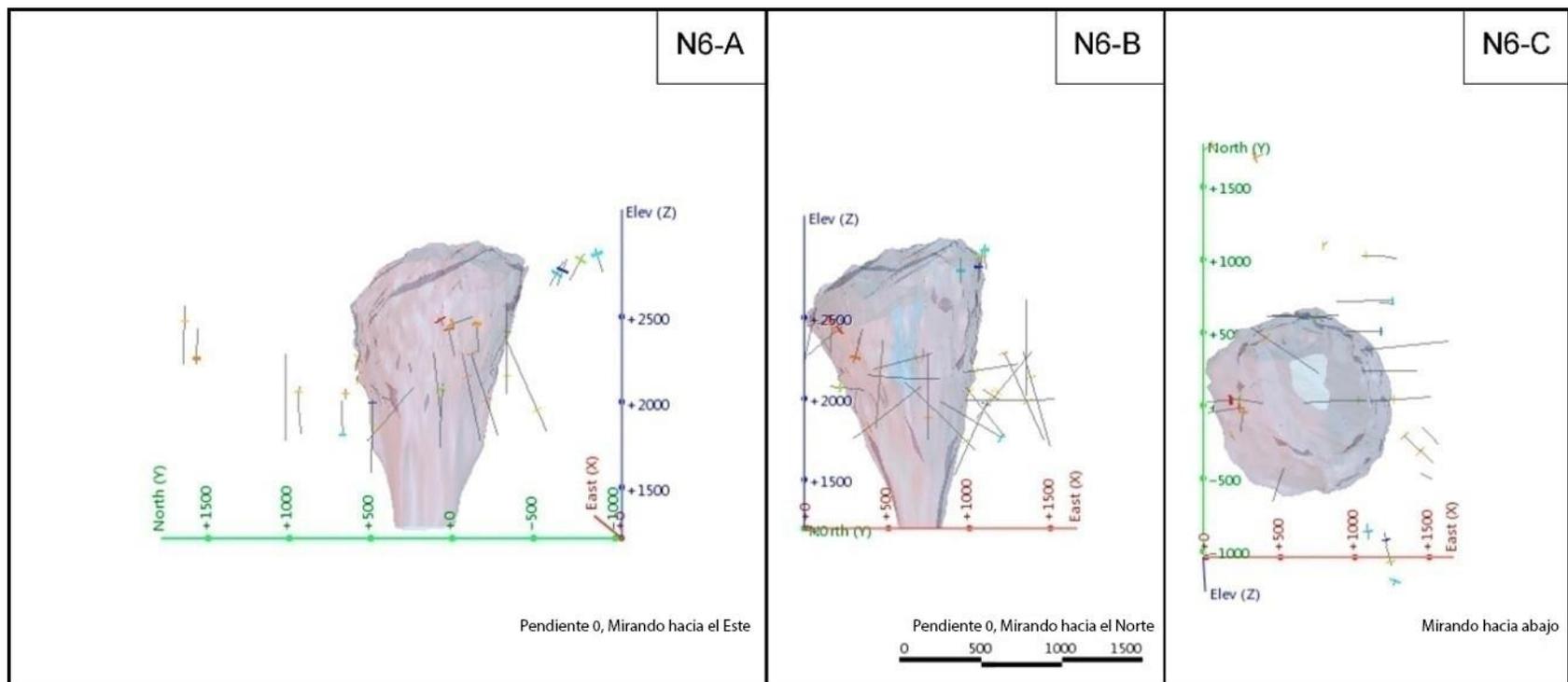
Anexo H. Distribución espacial del Nodo 3 de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta.



Anexo I. Distribución espacial del Nodo 4 de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta.



Anexo J. Distribución espacial del Nodo 6 de la red neuronal: Las figuras presentan el perfil NS, figura B perfil EW y la figura C perfil de planta.



Anexo K: Valores propios, variabilidad (%) y porcentaje acumulado del análisis de componentes principales.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valor propio	11,220	4,768	3,666	3,068	1,518	1,224	1,185	1,034	0,853	0,697
Variabilidad (%)	32,999	14,023	10,782	9,024	4,464	3,599	3,486	3,040	2,508	2,050
% acumulado	32,999	47,021	57,803	66,827	71,291	74,890	78,376	81,417	83,925	85,975
	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
Valor propio	0,631	0,552	0,499	0,449	0,437	0,363	0,321	0,291	0,270	0,229
Variabilidad (%)	1,857	1,623	1,467	1,320	1,287	1,069	0,945	0,856	0,794	0,673
% acumulado	87,832	89,455	90,921	92,241	93,528	94,597	95,541	96,397	97,191	97,864
	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30
Valor propio	0,204	0,162	0,089	0,063	0,048	0,035	0,031	0,024	0,017	0,016
Variabilidad (%)	0,600	0,478	0,262	0,184	0,141	0,103	0,092	0,071	0,049	0,048
% acumulado	98,464	98,942	99,204	99,388	99,529	99,632	99,725	99,795	99,844	99,892
	F31	F32	F33	F34						
Valor propio	0,014	0,012	0,006	0,005						
Variabilidad (%)	0,042	0,034	0,016	0,015						
% acumulado	99,935	99,969	99,985	100,000						