



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

**MÉTODOS DE EXPLORACIÓN APLICADO A DEPÓSITOS DE TIERRAS
RARAS EN ARCILLAS IÓNICAS DEL ÁREA DE CONCEPCIÓN, VIII
REGIÓN, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CRISTÓBAL FRANCISCO FOCK KUNSTMANN

PROFESOR GUÍA:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALVARO HENRÍQUEZ SALAZAR.

VALENTINA FLORES AQUEVEQUE.

SANTIAGO DE CHILE

2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE GEÓLOGO**

POR: CRISTÓBAL FRANCISCO FOCK KUNSTMANN

FECHA: 2023

PROFESOR GUÍA: BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

**MÉTODOS DE EXPLORACIÓN APLICADO A DEPÓSITOS DE
TIERRAS RARAS EN ARCILLAS IÓNICAS DEL ÁREA DE
CONCEPCIÓN, VIII REGIÓN, CHILE**

Las tierras raras (corresponden a un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica, de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (lantano a lutecio), además del itrio y el escandio, que se incluyen debido a sus similitudes geoquímicas. Su potencial en Chile no ha sido estudiado en profundidad y actualmente solo existe un proyecto en desarrollo en Concepción asociado a los depósitos de tierras raras iónicas hospedadas en regolitos,.

El objetivo principal de este trabajo es aplicar distintos métodos de exploración a zonas de potencial concentración de tierras raras asociadas a arcillas iónicas en regolito con el fin de determinar áreas de interés para la realización de futuras prospecciones. Para ello se ha desarrollado una metodología, donde el uso combinado de métodos de análisis como la fluorescencia portátil de rayos X y el ICP-MS, donde a partir de los resultados obtenidos se hace una caracterización estadística, geoquímica y geomorfológica del área de estudio.

Los principales resultados muestran que en la fluorescencia portátil de rayos X tiene una excelente correlación con el ICP-MS en elementos como el Itrio, con correlaciones casi iguales a 1. A partir de lo anterior se propone el uso de este elemento como guía de exploración en terreno.

Por otra parte, el área de estudio muestra un enriquecimiento en tierras raras livianas por sobre las tierras raras pesadas.

Por último, dado el uso de un método predictivo llamado los "pesos de la evidencia" se propone realizar labores de prospección futura en las zonas altas dentro del área de estudio y donde las litologías predominantes correspondan a rocas intrusivas graníticas.

DEDICATORIA

A mi familia y en especial a mis papás, Erich e Irene.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, principalmente a mis padres, Erich e Irene, por darme la oportunidad de poder estudiar lo que me gustaba y acompañarme a lo largo de este tiempo. También agradecer a mis hermanos: Constanza y Macarena, por todo su apoyo, cariño y acompañamiento durante este periodo; y a Andrés, gracias por enseñarme (a tu modo) esta carrera y tener paciencia por responder cada una de las dudas que muchas veces tuve. También agradecer a mi abuelita, la Pili, por todo lo que siempre hiciste por mí, desde ayudarme a recortar fotos para las tareas hasta hacerme once mientras que mis papás no estaban. A mis cuñados, Mayo, Axel y Guille, por esos consejos y conversaciones que muchas veces tuvimos cuando tenía dudas de como avanzar. También a mis sobrinos, Fran, Julián, Ale, Pablo y Alonso. Todo este trabajo es gracias a ustedes.

También, agradecer a todo el grupo de trabajo en DV, por darme tantas oportunidades en mi corta vida laboral (hasta ahora como geólogo) y poder desarrollar este trabajo que ha costado bastante tiempo terminar. Agradecer también a mi comisión por la ayuda otorgada durante el periodo de elaboración de este trabajo, a los profesores Brian Townley y a Valentina Flores, gracias por querer participar de este proyecto. También, agradecer especialmente a Álvaro quien ha sido parte importante de mi formación como geólogo, con sus enseñanzas, correcciones y apoyo.

Agradecer también a mis amigos de la vida: Iván, Cristóbal (Ceci), Diegui, Pablito y Golun. Gracias por esas eternas conversaciones, entre cervezas y piscolas, donde tantas veces tratamos arreglar el mundo. También agradecer a mis amigos del colegio: Dange, Oscar, Kevin, Isra y Mora, y sus pololas (las chiquillas) que se han ido agregando a este extenso grupo, gracias por la buena onda y el acompañamiento en este periodo.

A mis amigos de la U, Lukas y Mauri, y sobre todo Vicky y Tami, que han sido un apoyo y pilar muy importante para poder avanzar en esto. Sin ustedes dos saben que gran parte de este trabajo no sería lo que es, muchas gracias por todo. Gracias también al grupo de bachis, que tantas veces acompañaron durante este periodo universitario.

También y aunque no quieras aparecer acá, agradecer a la Jose. Muchas gracias por todo lo que me has dado durante este tiempo, el lograr terminar este trabajo en gran parte es gracias a ti.

Por último, agradecer a todos aquellos que pasaron en mi vida y que fueron parte importante en este proceso y en mi formación como geólogo.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	HIPÓTESIS DE TRABAJO	3
1.4	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	3
1.4.1	Diseño de la metodología de exploración	4
1.4.2	Validación de la Metodología de Exploración.....	4
1.4.3	Análisis de Datos	5
1.5	UBICACIÓN Y ACCESOS.....	5
1.6	FISIOGRAFÍA	6
1.7	CLIMA	9
2	MARCO GEOLÓGICO	10
2.1	ROCAS METAMÓRFICAS.....	11
2.1.1	Serie Oriental (SE)	11
2.2	ROCAS ESTRATIFICADAS.....	11
2.2.1	Formación Santa Juana (TrSj).....	11
2.2.2	Formación Quiriquina (Kq)	12
2.2.3	Formación Curanilahue (Ec).....	12
2.2.4	Sedimentos de Terrazas Marinas (PIHstm)	12
2.2.5	Sedimentos de Terrazas Fluviales (Hstf).....	13
2.2.6	Sedimentos de valles actuales (Hsva)	13
2.3	ROCAS INTRUSIVAS.....	13
2.3.1	Batolito de la Costa (Pzg).....	13
3	TIERRAS RARAS	15
3.1	GEOQUÍMICA	15
3.2	TIPOS DE DEPÓSITOS	18
3.2.1	REE en rocas ígneas	19
3.2.2	REE en rocas metamórficas	20
3.2.3	REE en rocas sedimentarias.....	21
3.2.4	REE en sedimentos.....	21
3.3	DEPÓSITOS EN CHILE	24
3.4	USOS Y APLICACIONES	26
3.5	EL MERCADO DE LAS TIERRAS RARAS	28

4	METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN	31
4.1	SELECCIÓN DE ZONAS A EXPLORAR.....	31
4.2	ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA PORTATIL DE RAYOS X	32
4.3	ANÁLISIS ICP-MS EN LABORATORIO	34
4.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO, GEOQUÍMICO Y GEOMORFOLÓGICO DE DATOS	35
5	RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
5.1	RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL MUESTREO	40
5.2	RESULTADOS GEOQUÍMICOS	46
5.3	RESULTADOS ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO	49
6	CONCLUSIONES	68
7	BIBLIOGRAFÍA	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Área de estudio y principales vías de acceso. Elaboración propia.	6
Figura 1.2: Geomorfología del área de estudio. Modificado de Freedman, 2018.	7
Figura 1.3: Cuencas y ríos presentes en el área de estudio.	8
Figura 2.1: Mapa geológico del área de estudio. Modificado de (Ferraris, 1981; Aguirre y otros, 1986; Aclara, 2021). Las coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.	10
Figura 3.1: Clasificación por grupo de tierras raras. Modificado de Villela y otros (2016).	16
Figura 3.2: Tipos de depósitos de REE y su contexto tectónico. Extraído de (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).	19
Figura 3.3: Perfil de suelo en un depósito de te tipo REE-HR. Se muestra zonación típica, horizontes de suelo y concentraciones de REE. Extraído de (Cocker, 2012).	24
Figura 3.4: Zona de estudio y ubicación del Proyecto Aclara.	25
Figura 3.5: Usos y aplicaciones de las tierras raras en el año 2008. Modificado de (U.S. Geological Survey, 2011).	27
Figura 3.6: Usos y aplicaciones de las tierras raras para el año 2016. Modificado de Goodenough et al., 2017.	27
Figura 3.7: Producción mundial de óxidos de tierras raras entre el año 1960 y el 2012. Extraído de (U.S. Geological Survey, 2017).	28
Figura 3.8: Principales proyectos de exploración y explotación de REE. Extraído de Watanabe, 2014.	29
Figura 3.9: Mercado de tierras raras pesadas (a) y tierras raras livianas (b) con sus precios desde el año 1970 al 2015. Extraído de (Fernandez, 2017).	29
Figura 4.1: Metodología del muestreo de taludes.	31

Figura 4.2: Diagrama de la metodología utilizada para la preparación de la muestra mediante análisis de fluorescencia portátil de rayos X.	34
Figura 4.3: Metodología para el cálculo del Weight of Evidence.	38
Figura 5.1: Ubicación muestras tomadas durante las campañas de terreno realizadas. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.....	40
Figura 5.2: Histogramas para la suma total de REE para cada método de análisis utilizado: (a) Análisis mediante pXRF con la suma de los 5 elementos medidos. (b) Suma de los 15 elementos medidos mediante ICP-MS.....	42
Figura 5.3: <i>Scatter plots</i> de correlación para resultados obtenidos en laboratorio y resultados obtenidos por fluorescencia portátil de rayos X.	44
Figura 5.4: Scatter Plots de valores de Y obtenidos mediante ICP-MS y concentraciones totales de REE, HREE Y LREE.....	46
Figura 5.5: Concentración normalizada a condrito de las muestras analizadas mediante ICP-MS.	47
Figura 5.6: Boxplots para los radios de fraccionamiento geoquímicos calculados.....	48
Figura 5.7: Histogramas para datos analizados en fluorescencia portátil de rayos X considerando Elevación, Pendiente, Orientación y Curvatura.	50
Figura 5.8: Histogramas para datos analizados mediante ICP-MS considerando Elevación, Pendiente, Orientación y Curvatura.....	51
Figura 5.9: Funciones de probabilidad acumulada para las muestras (a) resultados obtenidos mediante pXRF y (b) resultados obtenidos mediante ICP-MS.....	52
Figura 5.10: Funciones de probabilidad acumuladas y las familias que pueden ser reconocidas: (a) resultados obtenidos mediante pXRF y (b) resultados obtenidos mediante ICP-MS.	52
Figura 5.11: Ubicación de las muestras y las características elevación, pendiente, orientación y curvatura en cada punto muestreado. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.....	53

Figura 5.12: Ubicación de las muestras y NDVI cada punto muestreado. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad..... 54

Figura 5.13: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones de pXRF y una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad..... 57

Figura 5.14: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones de ICP-MS y una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad..... 61

Figura 5.15: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones ICP-MS y pXRF, considerando una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad. 62

Figura 5.16: Mapa de contrastes normalizados a valores negativos y positivos para una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad. 64

Figura 5.17: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones de pXRF y una ley de corte de 400 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad..... 67

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Tabla de precipitaciones y temperaturas medias dentro del área de estudio.	9
Tabla 3.1: Lista de REE encontradas de forma natural en la corteza terrestre, modificado de (U.S. Geological Survey, 2017)	17
Tabla 3.2: Producción de REE durante los años 2020 y 2021, seguido de las reservas de las principales productoras a nivel mundial. Modificado de (U.S. Geological Survey, 2022).....	30
Tabla 4.1: Valores de referencia para las clases ocupadas en el análisis por NDVI.	37
Tabla 5.1: Matriz de correlación de resultados de REE de ICP-MS con REE y elementos mayoritarios analizados mediante fluorescencia portátil de rayos X. Valores en verde son más cercanos a uno, en amarillo cercanos a cero y en rojo valores negativos.....	43
Tabla 5.2: Valores de condrito propuestos por McDonouh & Sun (1995)para cálculo de normalización.	46
Tabla 5.3: Calculo de Contraste para el método de los pesos de la evidencia, utilizando datos medidos mediante el método de fluorescencia de rayos X y una ley de corte de 200 ppm.....	55
Tabla 5.4: Calculo de Contraste para el método de los pesos de la evidencia, utilizando datos medidos mediante el método de ICP-MS y una ley de corte de 200 ppm.	59
Tabla 5.5: Calculo de Contraste para el método de los pesos de la evidencia, utilizando datos medidos mediante el método de fluorescencia de rayos X y una ley de corte de 400 ppm.....	65

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las tierras raras (REE: *Rare Earth Elements*) corresponden a un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica, de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (lantano a lutecio), además del itrio y el escandio, que se incluyen debido a sus similitudes geoquímicas (Villela y otros, 2016). Debido a sus propiedades físicas y químicas, las REE tienen un uso creciente en aplicaciones de la industria energética, tecnológica y militar. Actualmente la producción de tierras raras está ampliamente dominada por China, quien desde 1990 posee más del 90% del mercado productivo y cerca del 40% de las reservas (U.S. Geological Survey, 2022). Con el fin de retener los limitados recursos de estos elementos y disminuir los efectos ambientales que conlleva su explotación, China decidió restringir el suministro de REE en 2010, lo cual trajo consigo un aumento de precios en hasta un 3000% (Fernandez, 2017). Como resultado de las restricciones impuestas se produjo un aumento de las exploraciones para este tipo de elementos fuera de China (U.S. Geological Survey, 2017).

Pese a que se han identificado ocurrencias de REE en el mundo, que actualmente se encuentran en distintas etapas de exploración y desarrollo, éstas no han podido ser explotadas de manera rentable. Además, debido al bajo costo de producción de China, muchas minas han debido cerrar (López, 2017).

Las tierras raras pueden encontrarse en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, debido a que están presentes en las estructuras de varios silicatos como el granate, plagioclasas o pumpellyta (López, 2017).

La mayor parte de los depósitos económicos de REE se encuentran en carbonatitas, rocas ígneas ricas en carbonatos, las cuales son escasas y no se encuentran en Chile. También son frecuentes en rocas alcalinas, las cuales son poco comunes en el país (Villela y otros, 2016). Sin embargo, la Cordillera de la Costa de Chile Central se está desarrollando el proyecto Aclara (ex Biolantánidos), donde se han identificado sectores con potencial para explorar Tierras raras hospedadas en regolito, un tipo de

depósito de carácter secundario producido por la erosión y meteorización de regolitos. Esta exploración se ha producido debido a que se presentan las condiciones climáticas y geológicas necesarias para su formación (Li, Zhou, & Zhao, 2017; Sanematsu & Watanabe, 2016). Las litologías presentes son predominantemente graníticas y con trazas de minerales portadores de REE, formación de regolitos, paleosuperficies de baja pendiente donde pudo formarse el depósito y preservarse, un clima con precipitaciones y temperaturas medias a altas, con lo cual es posible que ocurran procesos supérgenos pedogenéticos que permiten el enriquecimiento de REE en el contacto entre pedolito y saprolito (Bustos, 2020; Molina, 2017).

En este trabajo se busca establecer una metodología de exploración que permita identificar este tipo de depósitos. Para ello se propone un método simple, rápido y barato para explorar potenciales zonas de concentraciones de este tipo de elementos, donde se propone la utilización de equipos portátiles de fluorescencia de rayos X (pXRF) para determinar anomalías y concentraciones de tierras raras, como método inicial y complementarla con el uso de técnicas de campo, laboratorio y gabinete, para así realizar un estudio completo de la concentración de este tipo de elementos en el área, lo cual se propone comprobar en el presente trabajo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Aplicar distintos métodos de exploración a zonas de potencial concentración de tierras raras asociadas a arcillas iónicas en regolito con el fin de determinar áreas de interés para la realización de futuras prospecciones.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar el modelo de mineralización de depósitos de tipo REE iónicas hospedadas en regolitos, en el sector de la Cordillera de Nahuelbuta, Concepción, VIII Región.
2. Determinar una metodología de exploración de tierras raras, validándola en lugares con presencia reconocida de REE y

basándose en métodos de exploración de este tipo de elementos recopilados a partir de información bibliográfica.

3. Determinar, a partir de las condiciones geológicas y geomorfológicas del sector, áreas de interés para realizar un muestreo y análisis de datos geoquímicos.
4. Comparar las concentraciones de REE en el área de interés con depósitos de tierras raras hospedadas en regolito reconocidos dentro de la zona de estudio.
5. Identificar y categorizar zonas de potencial para actividades de exploración futura de tierras raras, tomando como antecedente proyectos realizados en zonas cercanas y el modelo de mineralización conocido.

1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Dada la evidencia de la ocurrencia de depósitos de tierras raras hospedadas en regolito (REE-HR) en el área costera de Concepción, se plantea la existencia de nuevos sectores que se asocien a este tipo de depósito, por lo que se propone validar una metodología de exploración que permita reconocer y delimitar potenciales nuevas concentraciones de estos elementos para identificar nuevos blancos de exploración futura. Para ello se busca seguir un modelo de mineralización conocido para REEs considerando la litología presente, los procesos de meteorización y erosión, el clima y geomorfología de las áreas de interés.

1.4 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La metodología de trabajo se divide en tres grandes etapas, las cuales son caracterizadas en profundidad más adelante:

- En primer lugar se tiene el diseño de la metodología de exploración, la cual incluye una revisión bibliográfica para caracterizar el tipo de depósito a estudiar.
- Una etapa de validación de la metodología de exploración, donde se incluye la realización de un terreno que tiene como objetivo la obtención de muestras según lo diseñado. Para la validación de los resultados se utilizan dos métodos de análisis complementarios entre ellos.
- Por último se tiene una etapa de análisis de datos, a nivel estadístico, geoquímico y geomorfológico, que tienen como

objetivo final el poder definir potenciales áreas de prospección futura.

1.4.1 Diseño de la metodología de exploración

Esta etapa tiene como objetivo principal diseñar y afinar la metodología a utilizar para realizar la exploración de este tipo de elementos. Para ello se realiza una recopilación bibliográfica donde se selecciona y analiza información afín al modelo de mineralización presente en la zona, además de los métodos de exploración conocidos para explorar este tipo de depósitos. En base a esta información es posible definir una metodología de trabajo, además de realizar el marco geológico que permite tener una visión general del área de estudio.

La metodología, que será descrita más adelante, incluye la utilización de métodos de análisis complementarios, como lo son la fluorescencia portátil de rayos X (pXRF), como método cualitativo e indicativo de presencia de tierras raras, y el uso de ICP-MS en laboratorio, como un método cuantitativo y que sirve como base comparativa de la pXRF, además de permitir una calibración de este método.

1.4.2 Validación de la Metodología de Exploración

Dentro de la metodología se contempla realizar una campaña de terreno, la cual tiene como objetivo aplicar y validar la metodología diseñada anteriormente. Para realizar esto, se aplica el método de exploración en áreas de interés previamente seleccionadas, donde se cumplan los criterios de litología, meteorización y erosión, clima y geomorfología para encontrar nuevos blancos de exploración de REE hospedadas en arcillas, y también se recolectan muestras en el/los sitio(s) donde ya se ha reconocido la existencia de REE para el modelo de mineralización en cuestión.

Para realizar la validación de esta metodología se comparan los resultados obtenidos con aquellos encontrados durante la etapa bibliográfica.

1.4.3 Análisis de Datos

Una vez finalizada la etapa de terreno y considerando los resultados de laboratorio de las nuevas muestras recolectadas, se realizarán una serie de análisis:

- Análisis Estadístico: Tiene como fin comparar el comportamiento de los resultados al ser analizados mediante fluorescencia portátil de rayos X y mediante ICP-MS en laboratorio.
- Análisis Geoquímico: Aplicado a los resultados obtenidos mediante ICP-MS, con el objetivo de entender qué comportamiento están teniendo las REE con respecto a la corteza y en cada punto muestreado.
- Análisis Geomorfológico: Corresponde al análisis de ciertas característica en cada punto muestreado y como éstas pueden afectar o no a una potencial mineralización de REE, teniendo como resultado final un mapa predictivo de mineralización.

Mediante la aplicación de esta metodología se busca tener como resultado final un mapa predictivo de mineralización, con el cual aquellas se puedan identificar zonas con un alto potencial de tener presencia de REE.

1.5 UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio, expuesta en la Figura 1.1 dentro de un cuadro rojo, se encuentra ubicada cerca del área costera de la región del Biobío, entre los 36°42' y los 37° de latitud sur y los 73°2' y los 72°45' de longitud W, en la provincia de Concepción.

Desde Santiago se puede acceder a la provincia de Concepción utilizando la Ruta 5 Sur. Desde el centro de Concepción hay 3 rutas de acceso hacia las zonas de interés. Una de ellas es utilizar la ruta 152 (Autopista del Itata), utilizar la salida a la ruta O-440 y luego seguir por los caminos forestales no pavimentados del sector. Otra opción para entrar a la zona sur del área de estudio sería desde el centro de Concepción tomar la ruta 146 (Autopista Concepción – Cabrero) y continuar por esta hasta la ruta N-48-O, desde la cual se pueden tomar caminos forestales no pavimentados. También se puede seguir por la ruta 146 y utilizar las rutas O-680 o O-676 que conectan con caminos forestales no pavimentados que

permiten llegar hasta zonas de interés. En el área, el principal uso del suelo corresponde a plantaciones forestales.

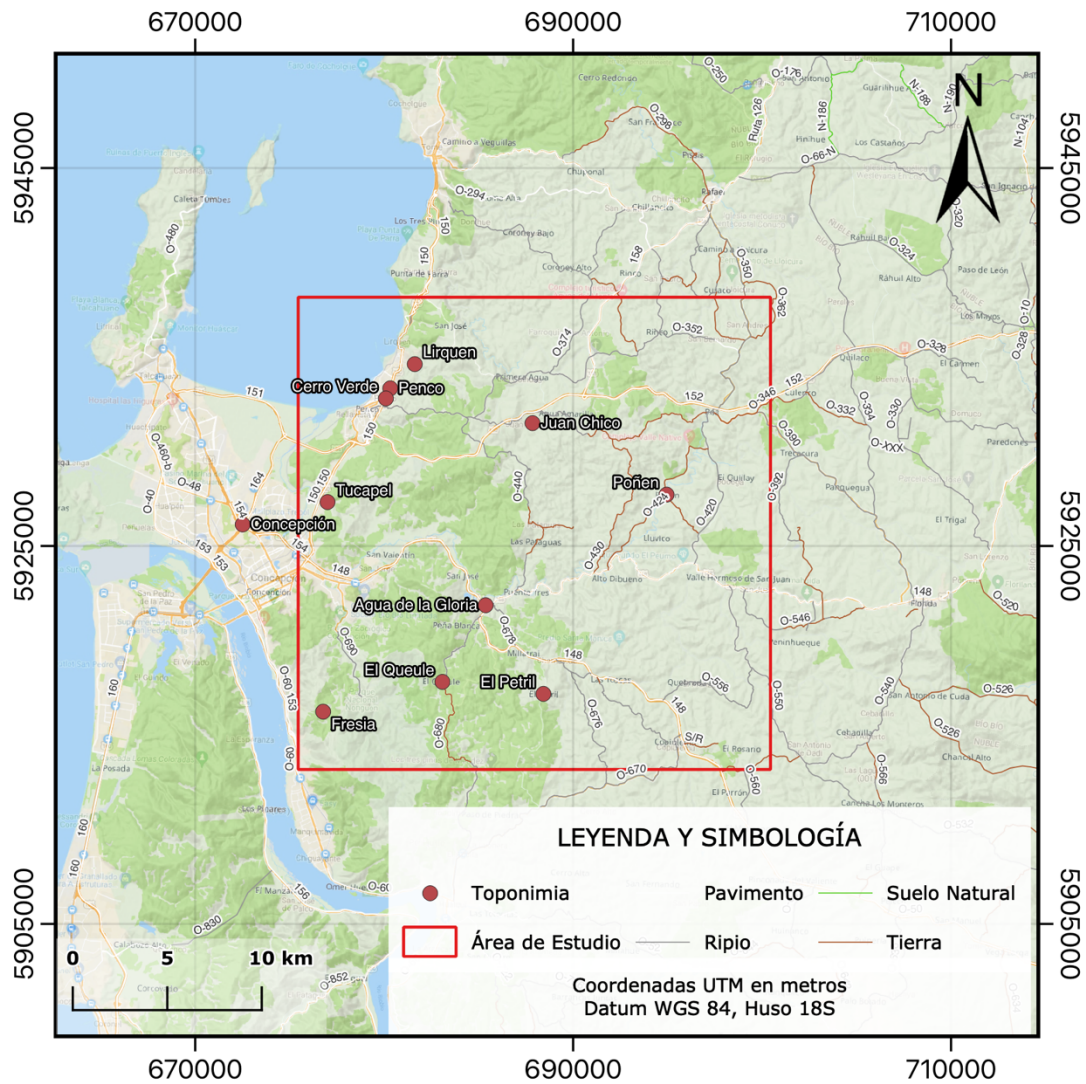


Figura 1.1: Área de estudio y principales vías de acceso. Elaboración propia.

1.6 FISIOGRAFÍA

Las morfologías que principalmente se reconocen en el área de estudio corresponden a las Planicies Costeras y la Cordillera de la Costa (Figura 1.2). Las Planicies Costeras fueron formadas gracias a los procesos de transgresión marina ocurridos desde el Holoceno, donde mientras que estas ocurrían, la abrasión marina provocaba la erosión del relieve y la formación de un acantilado, el cual era abandonado durante la progresión

marina que formó las líneas de costa regresivas que se observan hoy en día (Molina, 2017).

La Cordillera de la Costa se comporta de diferentes formas al norte y sur del río Biobío. Hacia el norte de éste, la Cordillera de la Costa no presenta grandes altitudes y no logra superar los 550 msnm, en cambio, hacia el sur del río Biobío se comienza a denominar como Cordillera de Nahuelbuta, donde se extiende por cerca de 190 km hasta el norte del río Imperial y logra altitudes cercanas a los 1400 msnm (Freedman, 2018). Su formación es mucho más antigua que la Cordillera de los Andes, teniéndose dataciones del Paleozoico Superior, con una rápida exhumación desde el Plioceno hasta hoy, con tasas de exhumación promedio de 0,21 mm/año (Rehak, 2008), experimentando en algunos casos alzamientos de hasta 1500 m. Es importante destacar, que desde su formación, la Cordillera de Nahuelbuta ha sido constantemente erosionada por agentes climáticos (Molina, 2017).

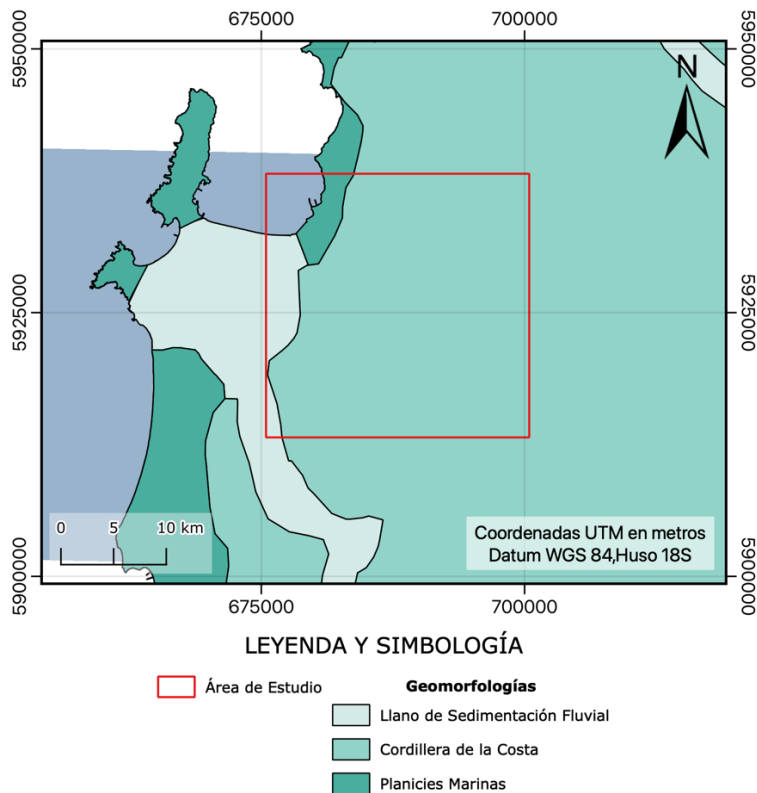


Figura 1.2: Geomorfología del área de estudio. Modificado de Freedman, 2018.

En el área de estudio se reconocen dos ríos, el río Biobío y el río Andalién, tal como se muestra en la Figura 1.3. De acuerdo a la Dirección General de Aguas (DGA), el río Biobío recorre gran parte de la zona sur del Valle Central, pasando por las provincias de Biobío y Concepción, es el segundo río más largo de Chile con un largo aproximado de 380 km, su cuenca hidrográfica es una de las mayor superficie, abarcando unos 24.265 km² y desemboca al mar en la ciudad de Concepción (Dirección General de Aguas, 2004). Por su parte, el río Andalién recorre la Cordillera de la Costa y desemboca justo al norte del río Biobío, en la comuna de Penco, tiene una longitud de unos 36 km y su cuenca abarca una superficie de 780 km² (Dirección General de Aguas, 2004).

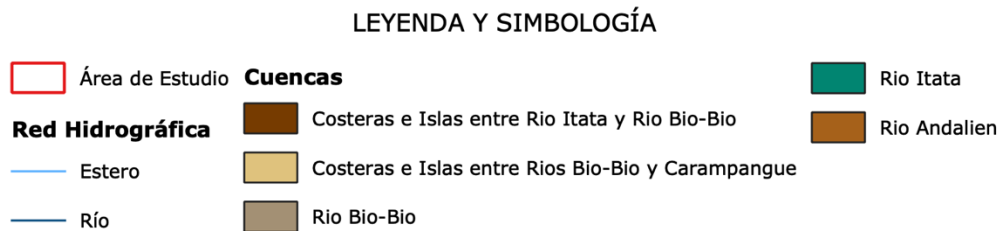
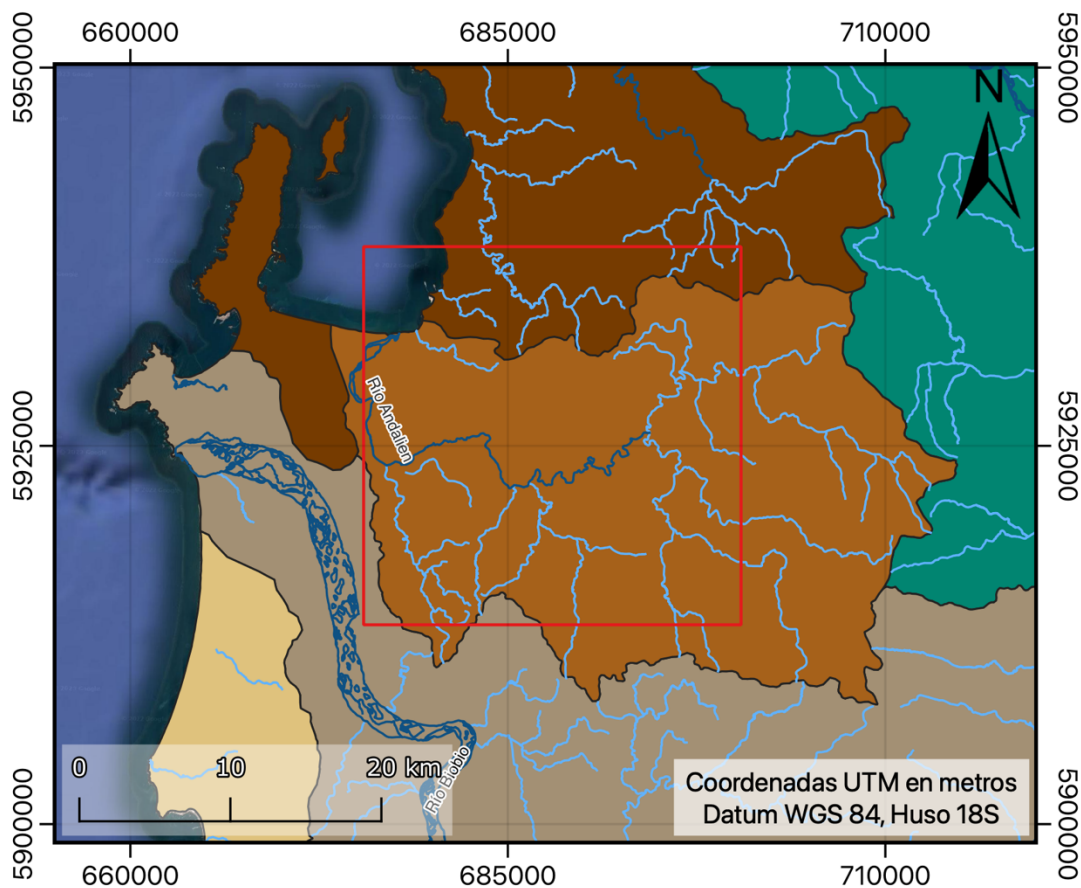


Figura 1.3: Cuencas y ríos presentes en el área de estudio.

1.7 CLIMA

La Región del Biobío es considerada una zona climática de transición, entre el clima mediterráneo presente hacia Chile Central y el clima templado húmedo que predomina hacia el sur del país (Alarcon, 2019).

La época de lluvia corresponde al periodo más frío del año, durante los meses de otoño e invierno, y de acuerdo a datos del CR2 (Center for Climate and Resilience Research), en el área de estudio se tiene una precipitación media anual de 1349 mm, considerando datos desde 1994, y la temperatura media en Concepción de los últimos casi 60 años es de cerca de 12,5°C (Tabla 1.1).

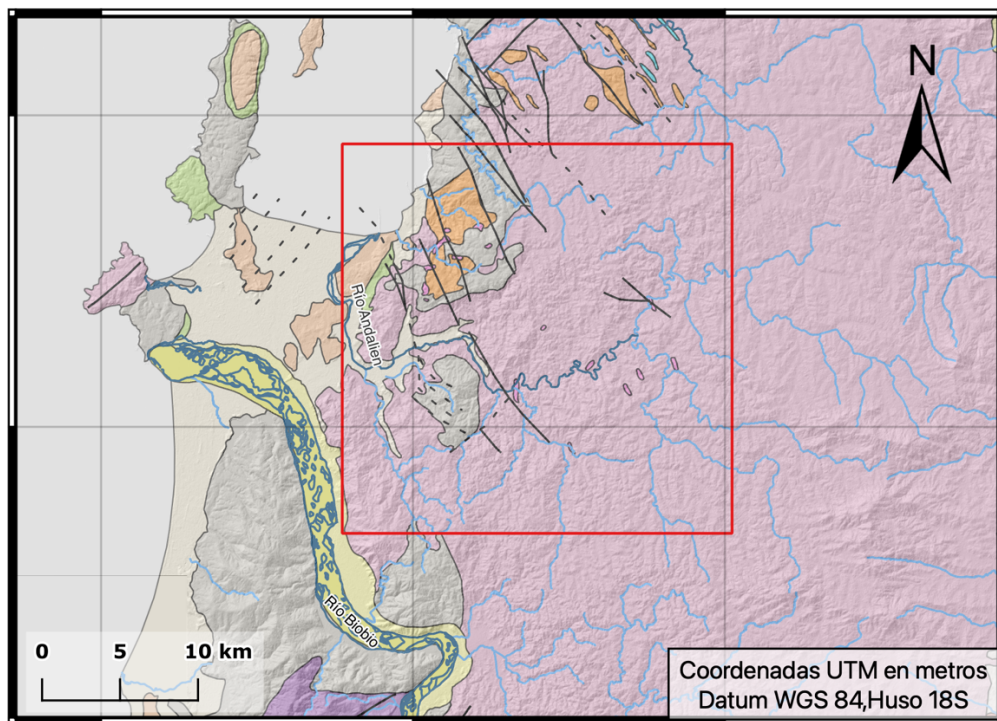
Tabla 1.1: Tabla de precipitaciones y temperaturas medias dentro del área de estudio.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precipitación promedio (mm)	11,04	18,90	24,92	85,81	183,50	319,10	256,51	207,50	112,38	63,30	40,40	26,27
Temperatura Media (°C)	16,54	15,90	14,36	12,22	10,89	9,44	8,80	9,23	10,10	11,71	13,77	15,63

Fósiles encontrados en la cuenca de Arauco, en la formación Ranquil ubicada al sur del área de estudio, reportan condiciones subtropicales, cálidas y húmedas para el periodo entre el Mioceno tardío y el Plioceno (Le Roux, 2011). Desde el Pleistoceno a la actualidad, esta configuración tropical y húmeda, ha variado a condiciones más frías y secas similares a las actuales.

2 MARCO GEOLÓGICO

En el área de estudio se reconocen rocas metamórficas, volcánicas, sedimentarias continentales y marinas con una orientación preferente NS. Estas tienen edades que van desde el Paleozoico superior hasta la actualidad. Estas rocas se encuentran intruidas por intrusivos de edad Paleozoica Superior a Jurásica. Las dos unidades principales que afloran en el sector corresponden a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico y al Batolito de la Costa, compuesto por tres subunidades dentro del área de estudio. Su distribución se presenta en la Figura 2.1.



LEYENDA Y SIMBOLOGÍA

 Área de Estudio	— Observada	 PIHstm Sedimentos de Terraza Marina (Pleisto-Holoceno)	Rocas Intrusivas
Red Hidrográfica	Rocas Metamórficas	 Hstf Sedimentos de Terraza Fluvial (Holoceno)	Batolito de la Costa (Paleozoico Superior-Triásico)
— Estero	 SE Serie Oriental (Paleozoico Superior)	 Hsva Sedimentos de Valles actuales (Holoceno)	 Granito de Biotita
— Río	Rocas Estratificadas		 Aplitas
Fallas	 TrSj Fm Santa Juana (Triásico Superior)		 Dioritas
- - - Inferida	 Kq Fm Quiriquina (Cretácico Superior)		 Granitoide de Granate
	 Ec Fm Curanilahue (Eoceno Inferior)		 Microdioritas

Figura 2.1: Mapa geológico del área de estudio. Modificado de (Ferraris, 1981; Aguirre y otros, 1986; Aclara, 2021). Las coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

2.1 ROCAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas que afloran en este sector son parte del Basamento Metamórfico que aflora en el borde occidental de Chile. Corresponde a una serie de complejos metamórficos e intrusivos paleozoicos que se distribuyen como una franja con orientación preferente NS, paralelo a la fosa, con afloramientos discontinuos entre los 34-37° latitud S y de forma continua entre los 37-43° latitud S.

2.1.1 Serie Oriental (SE)

Fue definida por Aguirre y colaboradores en 1972. Está constituida por metagrauwacas, filitas, rocas córneas y gneises asociados a granitoides. En esta serie, los mencionados autores definieron las zonas de biotita, de andalucita y de sillimanita. En el área de estudio afloran hacia el sector W de manera discontinua, con una dirección preferente NS.

El grado metamórfico corresponde a facies esquistos verdes y granulita (Gajardo, 1980), en condiciones de temperatura que no superan los 650°-700°C. El protolito de esta serie correspondería a una secuencias turbidítica de ambiente de plataforma (Herve, 1988; Cartes, 2004).

Antecedentes (Gonzalez-Bonorino, 1970; Gonzales-Bonorino & Aguirre, 1970; Munizaga y otros, 1973) de edades Rb-Sr de una amplia zona del basamento cristalino, indican una edad paleozoica superior para una importante fase metamórfica de la unidad (Herve, 1977).

2.2 ROCAS ESTRATIFICADAS

2.2.1 Formación Santa Juana (TrSj)

Definida por Cucurella (1978), corresponde a una secuencia sedimentaria continental y marina. Sobreyace en discordancia erosiva con el Basamento Granítico y se encuentra por sobre el Basamento Metamórfico, por un contacto por falla. En esta zona se encuentra al Sur del área de estudio. Compuesta por conglomerados de cuarzo, arcosas continentales, areniscas conglomerádicas, areniscas finas y lutitas; areniscas gruesas y arcillolitas de carácter marino; lutitas negras, areniscas y brechas de origen continental (Cucurella, 1978).

La Formación Santa Juana tendría una edad asignada el Triásico, dado su contenido faunístico y de flora.

2.2.2 Formación Quiriquina (Kq)

Fue definida por Biró (1982) como una secuencia siliciclástica depositada en un ambiente marino. Esta formación está principalmente constituida por areniscas conglomerádicas, areniscas finas y medias y arcillolitas marinas, que sobreyacen, en discordancia angular y de erosión a las filitas y esquistos del Basamento Metamórfico e infrayace concordante a la Formación Curanilahue y en paraconformidad a los depósitos del Cuaternario (Salazar, 2004). En el área de estudio aflora en la porción W de ésta.

La edad de esta formación se determinó sobre la base de su contenido fosilífero, donde se le asigna al Campaniano-Maastrichtiano (Biró, 1982; Salazar, 2004).

2.2.3 Formación Curanilahue (Ec)

Fue definida en 1959 por Muñoz-Cristi (Ferraris, 1981). Corresponde a una secuencia sedimentaria continental, constituida principalmente por areniscas, en parte conglomerádicas y arcillolitas asociadas a mantos carboníferos, con intercalaciones marinas, correspondientes a areniscas verdes fosilíferas (Pineda, 1983). Se encuentra al W del área de estudio.

Según los antecedentes paleontológicos conocidos, la edad asignada a la Formación Curanilahue es eocena inferior (Muñoz-Cristi, 1968).

2.2.4 Sedimentos de Terrazas Marinas (PIHstm)

Se define con esta denominación, a los sedimentos depositados en las terrazas litorales de la plataforma de Arauco-Lebu. Están constituidos, fundamentalmente, por arenas laminadas sub-horizontales, de ambientes costeros y dunas, con escasa compactación. Su espesor se estima en 20-30 m (Ferraris, 1981). Se encuentran en la porción W central del área de estudio.

Su edad se basa en su posición estratigráfica sobre la Formación Tubul (Plioceno), lo cual indica que los sedimentos de terrazas marinas serían

post-pleocenas. Sin embargo, considerando que los eventos sedimentarios marinos y costeros de la plataforma de Arauco-Lebu aparentemente son continuos, se le asigna a esta unidad una edad pleisto-holocena (Ferraris, 1981).

2.2.5 Sedimentos de Terrazas Fluviales (Hstf)

Esta unidad corresponde a los depósitos de gravas y arenas en niveles de terrazas, que se ubican sobre el río Bío-Bío en el área de estudio. Los espesores máximos alcanzan a 50-60 m, por sobre el nivel actual de los ríos, siendo los más extensos los del río Bío-Bío (Ferraris, 1981).

2.2.6 Sedimentos de valles actuales (Hsva)

Constituidos por arenas y gravas, se encuentran depositados en los cauces actuales de los ríos de la zona, en general, bajo el nivel de las terrazas fluviales anteriormente descritas. La composición de los clastos es variada, predominando los andesíticos y basálticos (Ferraris, 1981).

2.3 ROCAS INTRUSIVAS

2.3.1 Batolito de la Costa (Pzg)

Hervé (1977) denomina a esta unidad intrusiva como "Plutón Central de Nahuelbuta". Está constituida por granitos, tonalitas, granodioritas y dioritas, con zonas de migmatitas y gneises. El Batolito de la Costa aflora en toda la parte central de la Cordillera de Nahuelbuta. Intruye el Basamento Metamórfico (SE) e infrayace, en discordancia de erosión y depositacional, a la Formación Santa Juana (Trsj). Su edad, basada en estas relaciones de contacto, se estima como paleozoica superior-triásica inferior. En los bordes de este batolito afloran facies marginales de diorita cuarcífera, principalmente en el sector oriental del cuerpo, entre Angol y Nacimiento, fuera del área de estudio (Ferraris, 1981).

Corresponde a la parte central y más importante del área de estudio. De acuerdo con Aclara (2021), dentro de ésta se pueden reconocer distintas unidades, de las cuales destacan:

- **Granito de Biotita:** corresponde a una unidad fanerítica de grano grueso, compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita, anfíbol y en ocasiones feldespatos potásicos. En algunos afloramientos, el

saprolito de esta unidad es rico en arcillas e hidróxidos de hierro, dada la meteorización de feldespatos, biotita y anfíboles (Aclara, 2021).

- **Diorita:** Es caracterizada por un tamaño de grano fino a medio, compuesta principalmente por plagioclasa y biotita, además de cuarzo y anfíboles intersticiales. Contiene algunos sectores con presencia de mineralización de tierras raras intercambiables (Aclara, 2021).
- **Granitoide de Granate:** Consiste en tonalitas de granate y biotita, con granos de tamaño medio a grueso, compuestas por plagioclasa, cuarzo, granate y biotita, con pequeñas cantidades de anfíbol y feldespato potásico. El granate almandino es uno de los últimos minerales formados, caracterizado por cristales euhedrales, comúnmente con inclusiones en forma de anillo de cuarzo, apatito, anfíbol e ilmenita, así como minerales accesorios ricos en REE. Con frecuencia, en esta unidad se han reconocido dioritas y metapelitas irregulares y subangulares de tamaño centimétrico a métrico (Aclara, 2021).

3 TIERRAS RARAS

El término "raro" en su nombre data de principios del siglo XX, pues en ese momento eran elementos difíciles de separar de los minerales que los contenían, además de no haberseles considerado de gran utilidad. En este sentido, el término "tierra" es una antigua denominación para los óxidos y minerales con aspecto terroso. A pesar de que su nombre sugiera una abundancia escasa dentro de la corteza terrestre, éstas pueden ser más abundantes que el plomo, el oro o el platino (De la Hoz, 2012). Sin embargo, las tierras raras no suelen formar depósitos económicamente extraíbles, pues rara vez se encuentran grandes depósitos minerales concentrados o de grandes dimensiones en donde puedan ser extraídos por métodos de minería convencional (Werner y otros, 2013).

Las REE son elementos que se han vuelto muy importantes el último tiempo, dada sus propiedades magnéticas, fosforescentes y catalíticas, las cuales hacen que sean críticas para la confección de teléfonos celulares, televisores, turbinas, baterías, etc.

3.1 GEOQUÍMICA

Las tierras raras (REE: *Rare Earth Elements*) corresponden a un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica, de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (lantano a lutecio), además del itrio y el escandio, que se incluyen debido a sus similitudes geoquímicas (Villela y otros, 2016) y tienden a ocurrir en los mismos depósitos que los lantánidos (Balaram, 2019). Todas las REE se encuentran de forma natural en la corteza, aunque no en forma de metales, excepto por el Prometio que solo ocurre como elemento en traza en algunos procesos, dado que no tiene isótopos estables o de larga duración (Balaram, 2019).

Las REE se clasifican en dos grupos de acuerdo a su peso atómico. El primero de ellos corresponde a las tierras raras livianas (LREEs), que comprende los elementos existentes entre el lantano y el gadolinio, con números atómicos entre 57 y 64. El otro grupo corresponde a las tierras raras pesadas (HREEs) que incluye los elementos entre el terbio y el lutecio, con pesos atómicos entre 65 y 71. El itrio, aunque podría encontrarse dentro de las tierras raras livianas debido a su peso atómico (39), es incluido dentro de las HREEs por su afinidad química y física con

las tierras raras pesadas. Las tierras raras livianas suelen ser más abundantes que las pesadas.

Algunos investigadores proponen la existencia de un grupo intermedio de tierras raras (Figura 3.1), compuesto por el samario, europio, gadolinio y terbio, el cual denominan "tierras raras intermedias (Vilella y otros, 2016).

Livianas							Pesadas							Otros	
La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Pm

Figura 3.1: Clasificación por grupo de tierras raras. Modificado de Vilella y otros (2016).

Las concentraciones totales promedio de REE (Tabla 3.1) en la corteza terrestre varían entre 130 ppm a 240 ppm, lo cual es mucho mayor a promedios de algunos elementos que se suelen explotar, como el cobre o el oro, y mucho mayor a su respectiva abundancia condritica (Balaram, 2019).

Tabla 3.1: Lista de REE encontradas de forma natural en la corteza terrestre, modificado de (U.S. Geological Survey, 2017)

Elemento	Símbolo	Número Atómico	Peso Atómico	Abundancia en corteza (ppm)
REE Livianas				
Lantano	La	57	138,91	39
Cerio	Ce	58	140,12	66,5
Praseodimio	Pr	59	140,91	9,2
Neodimio	Nd	60	144,24	41,5
Samario	Sm	62	150,36	7,05
Europio	Eu	63	151,96	2
Gadolinio	Gd	64	157,25	6,2
REE Pesadas				
Itrio	Y	39	88,91	33
Terbio	Tb	65	158,92	1,2
Disprosio	Dy	66	162,5	5,2
Holmio	Ho	67	164,93	1,3
Erbio	Er	68	167,26	3,5
Tulio	Tm	69	168,93	0,51
Yterbio	Yb	70	173,04	3,2
Lutecio	Lu	71	174,97	0,8

En el grupo de los lantánidos, la configuración de valencia de la capa más externa es la misma para todas las especies, mientras que los orbitales 4f van siendo llenados progresivamente a medida que aumenta el número atómico. Las características de los orbitales 4f conducen a propiedades físicas y químicas muy similares para estos elementos, las cuales hacen que las REE sean frecuentemente encontradas juntas en la corteza terrestre, principalmente por su carga trivalente (+3) y su radio iónico similar (Balaram, 2019).

Otra propiedad química en este tipo de elementos es la llamada "Contracción lantánida" donde los radios iónicos reducen su tamaño desde el La^{3+} (1.06 Å) al Lu^{3+} (0.85 Å) (Balaram, 2019), lo cual afecta en primer lugar a su grado de fraccionamiento, aumentándolo y produciendo una separación de éstas hacia algunos ambientes geológicos, además de

otorgarles ciertas propiedades químicas y físicas útiles, como propiedades físicas y ópticas inusuales (U.S. Geological Survey, 2017).

En sistemas magmáticos, la alta carga de los iones de REE (+3) impide que estos elementos logren un balance de carga y logren entrar a la estructura de ciertos minerales formadores de rocas, como anfíbolos, feldespatos u olivinos los cuales generalmente tienen estados de valencia de 1 o 2, lo que provoca que cuando estos cristalizan gran parte de las tierras raras suelen quedarse en el fundido coexistente. Una excepción a esta regla es el Europio, que suele encontrarse deprimido en los magmas porque tiende a incorporarse en las estructuras de los feldespatos al tener un estado de valencia de +2 (Balaram, 2019) (U.S. Geological Survey, 2017). Si este proceso, llamado de cristalización fraccionada, sucede muchas veces la concentración de REE en el fundido restante tiende a aumentar, hasta que fases ricas en tierras raras pueden cristalizar. Es por esta razón que tienen relevancia otro tipo de minerales como los fosfatos, carbonatos o arcillas, siendo las principales menas de este tipo de elementos los minerales como la monacita ((REE,Th,Y)PO₄) y xenotimo (fosfatos), la bastnasita (REE(CO₃)F-carbonato) y allanita (Ca(Ce,La,Y)(Al₂Fe₂⁺)-silicato). La mineralogía de los depósitos de REE es fundamental, pues se opta por preferir aquellos minerales que son más fáciles de descomponer, como el carbonato de bastnasita, por sobre aquellos que son más difíciles de disociar (López, 2017).

3.2 TIPOS DE DEPÓSITOS

Las tierras raras pueden encontrarse tanto en rocas metamórficas, sedimentarias o ígneas, siendo este último tipo de rocas los depósitos más conocidos y con las concentraciones más altas encontradas, destacándose los depósitos de carbonatitas, depósitos asociados a complejos alcalinos, depósitos asociados a uranio, depósitos de IOCG y depósitos de REE hospedadas en regolitos, también conocidas como REE de tipo ión-adsorción (REE-HR), entre otros (Watanabe, 2014). Tal como se observa en la Figura 3.2, los depósitos de REE se pueden encontrar en diversos contextos geológicos y tectónicos.

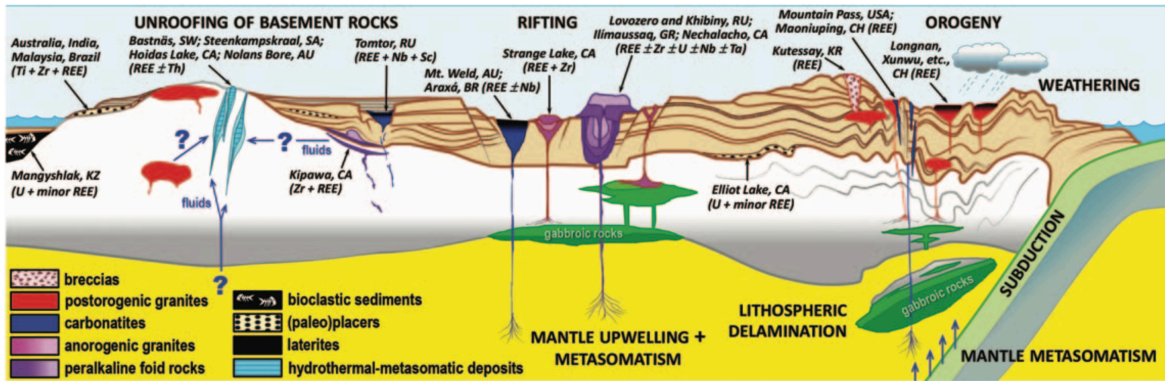


Figura 3.2: Tipos de depósitos de REE y su contexto tectónico. Extraído de (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

3.2.1 REE en rocas ígneas

Los depósitos ígneos de tierras raras suelen ocurrir en entornos extensionales, intracontinentales y anorogénicos, asociados a tectónica de extensión o a ascensos de plumas astenosféricas. En este tipo de ambientes, el adelgazamiento de la litósfera continental facilita la fusión del manto por descompresión y así, el emplazamiento de magmas de distintos tipo, incluidos aquellos insaturados en sílice y ricos en álcalis, los cuales suelen ser aquellos que se enriquecen en REE (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

3.2.1.1 Carbonatitas

Muchos depósitos de REE alrededor del mundo están asociados a carbonatitas, las cuales son rocas ígneas derivadas de magmas pobres en sílices y ricos en carbonatos. Por lo general este tipo de rocas contienen las concentraciones más altas de REE (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012), las cuales a medida que el magma se cristaliza pueden concentrarse como fases minerales primarias de REE o puede verse enriquecido en magmas o fluidos de fases más tardías, dando como resultado una mineralización de REE con alta concentración de tierras raras livianas (U.S. Geological Survey, 2017), siendo carbonatos y fosfatos, como la monacita, los principales portadores de estos elementos (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

3.2.1.2 *Rocas peralcalinas subsaturadas*

Las REE también suelen asociarse a procesos ígneos alcalinos, sobretudo al magmatismo peralcalino. Las rocas ígneas alcalinas precipitan de magmas subsaturados en sílice y fluidos enriquecidos en elementos alcalinos, precipitando minerales que contienen sodio y potasio (U.S. Geological Survey, 2017). Este tipo de rocas están asociadas con procesos de enriquecimiento de REE, donde a diferencia de lo que ocurre en carbonatitas, la génesis magmática primaria en las rocas peralcalinas carece de monacita o carbonatos de REE. La mayor parte de su contenido de tierras raras se distribuye entre los fosfatos del grupo del apatito, el zircón y los titanosilicatos accesorios. En este sentido, las rocas que contienen grandes concentraciones de minerales ricos en REE se forman por sedimentación por gravedad a partir de magmas extremadamente diferenciados, probablemente derivados de la cristalización fraccionada de feldespatoides, feldespatos y otros (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

3.2.1.3 *Granitos peralcalinos*

Las rocas graníticas suelen contener diferentes cantidades de elementos como Al, Ca o álcalis, por lo que generalmente suelen formarse arreglos distintos de minerales de REE accesorios dentro de ellas. Bajo este contexto, las concentraciones más altas de tierras raras en este tipo de rocas suelen encontrarse en granitos peralcalinos anorogénicos, con rangos entre 300 a 800 ppm de REE totales. Así, los sistemas extremadamente evolucionados suelen alcanzar niveles mucho más altos de enriquecimiento a través de una combinación de cristalización fraccionada y concentración de REE en fundidos residuales ricos en Fluor. Una característica que convierte a los granitos peralcalinos en un objetivo de exploración importante, es su enriquecimiento en tierras raras pesadas (HREE) en comparación con otras rocas ígneas (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

3.2.2 REE en rocas metamórficas

No existen muchos datos relacionados con la presencia de tierras raras rocas metamórficas, dado que la mayoría de los estudios se han centrado más en valores de roca completa y muy pocas veces se ha documentado la presencia de este tipo de elementos en minerales individuales

presentes en este tipo de rocas. Dado esto es muy raro ver depósitos de REE en rocas metamórficas, las cuales depende su contenido de los minerales presentes en el protolito de estas, su abundancia y las condiciones físicas y químicas en las que se desarrollaron éstos (Grauch, 1989).

3.2.3 REE en rocas sedimentarias

De manera similar a lo ocurrido en rocas metamórficas, las concentraciones de tierras raras en rocas sedimentarias suele depender del protolito a partir del cual se formó ésta.

3.2.4 REE en sedimentos

Es posible encontrar concentraciones importantes de REE en sedimentos, específicamente en arcillas. Los depósitos de arcillas de adsorción de iones hospedadas en regolitos (REE-HR) son formados por la meteorización de rocas ígneas en ambientes generalmente tropicales a subtropicales y corresponden a la principal fuente de tierras raras pesadas (HREE). La mineralogía de estos depósitos es relativamente simple comparado a los depósitos de roca dura, como las carbonatitas, debido a que la meteorización y descomposición de los minerales primarios que contienen REE produce que éstas sean liberadas como iones en solución, los cuales pueden ser adsorbidos como cationes hidratados, cationes hidroxilos hidratados o pueden formar fases secundarias (Cocker, 2012). En este caso, las arcillas suelen cumplir un rol fundamental ya que las REE movilizadas como elementos lixiviados suelen fijarse a este tipo de minerales.

De acuerdo a Li y colaboradores (2017), las REE provienen de granitos parentales, donde éstas se alojan dentro de minerales accesorios de éstos. Estos granitos al estar expuestos a condiciones de meteorización provoca que estos minerales se descompongan y liberen los elementos que los componen. Por ejemplo, minerales como el fluorocarbonato, fluorita, allanita, titanita y apatita son susceptibles a la intemperie y liberan REE^{3+} hacia el agua meteórica, donde la continua infiltración de agua puede removilizar estos elementos desde la parte superior de la corteza meteorizada hacia la parte inferior, pudiendo ser recristalizados

en fases minerales secundarias, ser adsorbidos o ser arrastrados hacia el flujo de agua subterránea, procesos que son controlados por el pH y Eh.

El pH en este caso es fundamental en el proceso de meteorización de la corteza, controlando la tasa de meteorización y disolución mineral, además de la adsorción de los elementos. Por otra parte, los fluidos principales en este proceso serán el agua lluvia, que penetra verticalmente la corteza, y las aguas subterráneas que movilizaran de forma horizontal los fluidos meteóricos. El agua meteórica por su parte, es ligeramente ácida, lo que provoca que su pH sea relativamente bajo, pero a medida que esta comienza a profundizar comienza a aumentar dada la interacción fluido – mineral. Este aumento es visible por ejemplo en el depósito Zudong en China, donde según Wu y colaboradores (1990), el pH en la superficie del suelo va entre 4,4 - 5,2, aumentado a 5,5 – 6,0 en el horizonte B y a 6,3 en el horizonte C. Esto es importante, dado que la evidencia muestra que las concentraciones más altas de REE están asociadas a los pHs más altos (Li y otros, 2017). En resumen, la movilización de tierras raras está facilitada por un pH bajo, mientras que la reprecipitación de estas se da en rocas menos alteradas y donde el pH del fluido ha aumentado.

En este sentido, el perfil redox del suelo también influye en el proceso de meteorización de la corteza. Como es de esperar, a medida que se aumenta la profundidad en la corteza la influencia del oxígeno en esta disminuye, por lo que la meteorización oxidativa se va debilitando. En este sentido, las anomalías positivas de Cerio (Ce) en la superficie, las cuales se consideran un indicador para la exploración de REE (Li y otros, 2017), podrían ser explicadas por este fenómeno dado que el Ce^{3+} es oxidado a Ce^{4+} , lo cual produce que el Ce sea inmovilizado como cerianita (CeO_2) y que los elementos de tierras raras se desacoplen como iones trivalentes en solución. Estas anomalías positivas de Ce suelen encontrarse en el horizonte B superior, que generalmente se encuentra empobrecido en REE y está sobrepuesto a una horizonte enriquecido en REE pero empobrecido en Ce.

Por lo general, los depósitos de arcillas de adsorción de iones hospedadas en regolitos suelen presentar leyes bastante bajas que van entre el 0.05 a 0.2% en peso de tierras raras totales y por lo general tienen tonelajes inferiores a los 10 mil toneladas de REO como recurso (Li & Zhou, 2020).

El beneficio que tiene este tipo de depósitos es que extraer las REE de ellos tiene un costo comparativamente más bajo al que tienen los otros tipos de depósitos.

Este tipo de depósitos suele ser una fuente secundaria de REEs, formadas por procesos exógenos, pues se forman por la lixiviación de tierras raras desde rocas ígneas graníticas debido a procesos de meteorización química y física (Li y otros, 2017). Esta lixiviación produce fluidos enriquecidos en REE que percolan la columna de suelo, donde una parte de estas REE son adsorbidas por arcillas como la caolinita, halloysita e illita, quedando una fracción restante no recuperable mediante el método típico de lixiviación con sulfato de amonio (Bustos, 2020). Las REE desorbibles, denominación utilizada para la fase de interés económico, corresponden a cerca de un 50% de la concentración de total de tierras raras, aunque hay antecedentes de que este valor puede llegar hasta el 90% (Li y otros, 2017).

Para que se produzcan este tipo de depósitos, es necesario que se cumplan 3 pasos esenciales (Bustos, 2020):

1. Emplazamiento de un cuerpo intrusivo con contenido de REE removibles.
2. Un proceso de meteorización de estos intrusivos que produzca el desarrollo de perfiles de meteorización gruesos (6-10 m) y una adsorción de estos elementos por parte de minerales arcillosos.
3. La preservación de estos perfiles de meteorización según las condiciones climáticas presentes en el sector, por lo que es necesaria una meteorización física leve a media en pedimentos, es decir, en planicies donde no existe una pendiente superior a 11° y donde la acumulación de REE sea favorable.

Si todos los procesos anteriores se cumplen, la lixiviación supérgena afecta a esta roca meteorizada y se forma un perfil de suelo, representado en la Figura 3.3, el cual está dividido en cuatro sectores según la cantidad de REE intercambiables presentes en cada uno de estos:

1. Primero se tiene la zona lixiviada o estéril de REE, que incluye el horizonte "A", de suelo orgánico. Debido a la lixiviación, esta zona

se encuentra empobrecida de REE (Cocker, 2012) y enriquecida en Cerio (Bustos, 2020) (Li y otros, 2017).

2. Se tiene una zona con mineralización de REE, debido a que las REE intercambiables son adsorbidas por minerales secundarios como caolinita (Cocker, 2012) y está empobrecida de Cerio. Esta zona corresponde principalmente al horizonte "B" del pedolito, pero también tiene una fracción del horizonte "C". Esta zona mineralizada puede variar su espesor entre 0.3 a 20 m (Cocker, 2012).
3. Posterior a esto se tiene una zona donde se tiene una fase de transición hacia una roca meteorizada en menor magnitud.
4. Por último se tiene el punto en el perfil que se encuentra el intrusivo sin alteración.

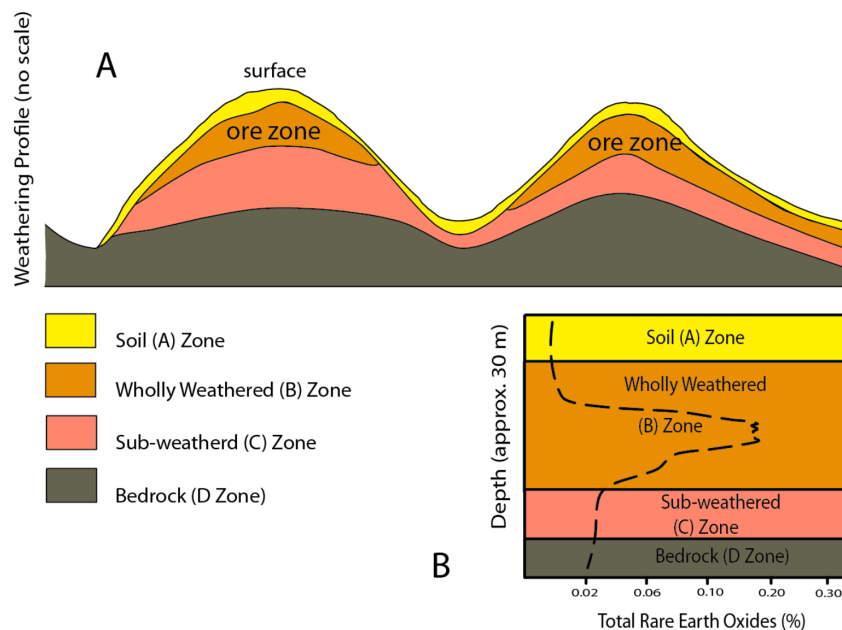


Figura 3.3: Perfil de suelo en un depósito de te tipo REE-HR. Se muestra zonación típica, horizontes de suelo y concentraciones de REE. Extraído de (Cocker, 2012).

3.3 DEPÓSITOS EN CHILE

En las cercanías de Diego de Almagro, III Región, se han encontrado tres prospectos: Cerro Carmen, Sierra Áspera y Veracruz, donde el primero es más prometedor con respecto a su tonelaje y leyes, seguido de por Sierra Áspera, que tiene mejor ley pero menor tonelaje. Los principales minerales con presencia de estos elementos son óxidos de REE, de hierro, de uranio y de torio además de ilmenita, davidita y esfeno. (Villega y otros, 2016).

Por otra parte, en la Cordillera de la Costa del área de Concepción y dentro del área de estudio (ver Figura 3.4) se está desarrollando el proyecto Aclara (ex Biolantánidos), donde se han identificado sectores con potencial para explotar depósitos del tipo REE-HR, donde han declarado presentar las condiciones climáticas y geológicas necesarias para su formación (Aclara, 2021). Las litologías presentes son predominantemente graníticas y con trazas de minerales portadores de REE, regolitos de gran potencia, paleosuperficies de baja pendiente donde pudo formarse el depósito y preservarse, un clima con precipitaciones y temperaturas medias a altas, con lo cual es posible que ocurran procesos supérgenos pedogenéticos que permiten el enriquecimiento de REE en el contacto entre pedolito y saprolito (Bustos, 2020).

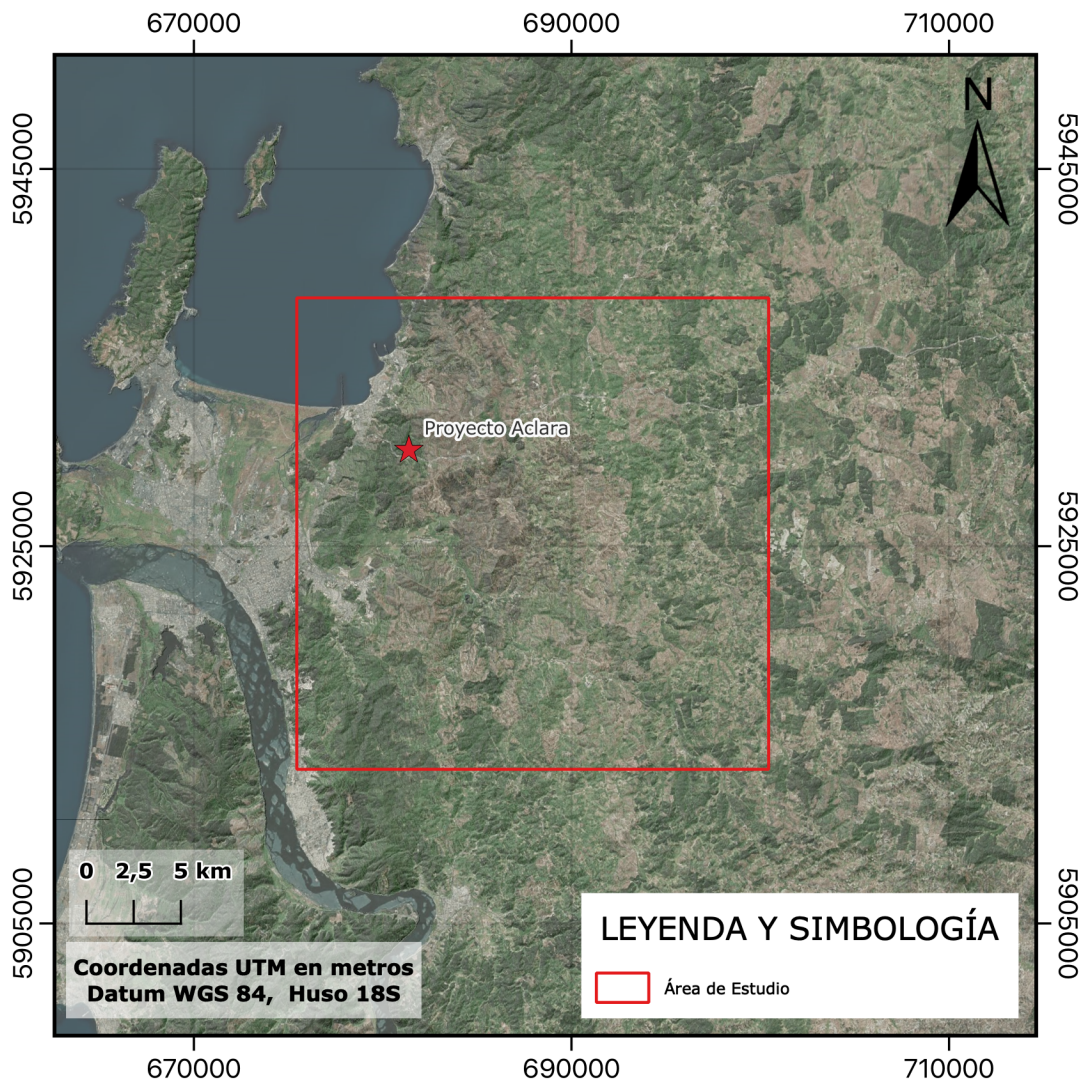


Figura 3.4: Zona de estudio y ubicación del Proyecto Aclara.

3.4 USOS Y APLICACIONES

Dadas sus características físicas y químicas, las tierras raras suelen tener un gran espectro de usos dentro de la industria y la tecnología. Dada sus similitudes químicas, las REE tienen usos relacionados y complementarias entre ellas, es decir, por lo general son utilizadas de forma conjunta entre ellas. Es por esto que más que describir su uso elemento por elemento, se habla de sus uso en distintas aplicaciones (U.S. Geological Survey, 2017).

Por lo general, las tierras raras livianas y el Itrio son más baratos que las tierras raras pesadas, por lo que son producidas en mayores cantidades y mucho más utilizadas, comparativamente. Las REE pesadas en tanto, tienen usos mucho más específicos dentro de la industria tecnológica (U.S. Geological Survey, 2017).

Hacia el año 2008, los usos principales de las REE se relacionaban con la producción de catalizadores utilizados dentro de la industria del petróleo y los convertidores catalíticos, la producción de vidrios, usos dentro de la industria metalúrgica y producción de fósforos. Últimamente y con el creciente aumento del uso de sistemas de energía alternativos, las tierras raras han comenzado a utilizarse para la producción masiva de baterías en autos eléctricos, además de la producción de imanes para motores de automóviles eléctricos, parlantes o molinos de viento.

El año 2008, 129.000 toneladas de óxidos de tierras raras (REO) fueron utilizadas a nivel mundial para la producción de los distintos usos que tienen estos elementos (U.S. Geological Survey, 2011). Para ese año, el 60% de las REE utilizadas fueron para la producción de sus usos "más típicos" (catalizadores, vidrios e industria metalúrgica), el 40% restante fueron utilizadas en tecnología más innovadora (aleaciones para baterías e imanes). Los elementos más utilizados para sus usos más típicos corresponden en su mayoría a Cerio (45%), Lantano (39%) e Itrio (8%). El porcentaje restante se distribuye entre Disproso, Gadolinio, Neodimio y Praseodimio. Por otra parte, los elementos más utilizados dentro de sus usos más innovadores corresponden a Neodimio (41%), Lantano (16%), Cerio (15%), Praseodimio (14%), Itrio (10%), Disproso (2,5%) y Gadolinio y Samario con cerca de 1% (U.S. Geological Survey, 2011).

Usos y aplicaciones año 2008

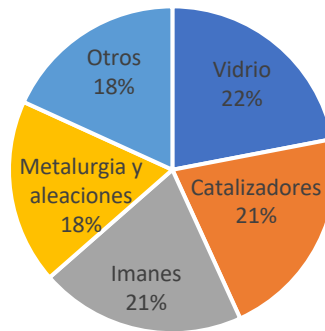


Figura 3.5: Usos y aplicaciones de las tierras raras en el año 2008. Modificado de (U.S. Geological Survey, 2011).

De acuerdo a Goodenough y colaboradores (2017), los principales usos de las tierras raras para el año 2016 cambiaron con respecto a lo ocurrido en el año 2008, aumentando considerablemente el uso de estos elementos para la elaboración de baterías e imanes de Nd-Fe-B (Neodimio – Hierro – Boro), utilizados ampliamente en la industria de vehículos eléctricos.

Usos y aplicaciones año 2016

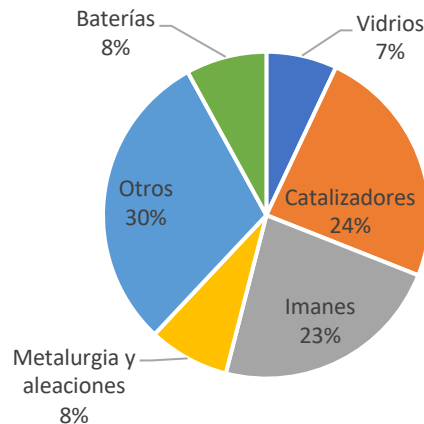


Figura 3.6: Usos y aplicaciones de las tierras raras para el año 2016. Modificado de Goodenough et al., 2017.

Como se pueden observar de las Figura 3.5 y Figura 3.6, en 8 años se pasó de un uso en imanes y baterías de un cerca de un 21% hacía el año 2008, a más de un 30% para el año 2016. Esto tiene que ver con la

creciente utilización de este tipo de elementos en la industria tecnológica y de electromovilidad, la cual ha seguido en constante aumento. Por otra parte, los usos más típicos que tuvieron estos elementos durante los años ha disminuido su demanda, siendo cerca de un 60% para el año 2008 en usos como producción de catalizadores, vidrios e industria metalúrgica, a poco menos de un 40% para el año 2016.

3.5 EL MERCADO DE LAS TIERRAS RARAS

Como se observa en la Figura 3.7, desde la década de 1990 la producción de REE ha sido ampliamente dominado por China, con más de un 90% de la producción a nivel mundial. En este sentido, las reservas globales de REE se estimaron sobre la base de óxidos de tierras raras (REO) en 120 millones de toneladas métricas y fueron lideradas, en orden decreciente de reservas, por China, Vietnam, Brasil e India (U.S. Geological Survey, 2022).

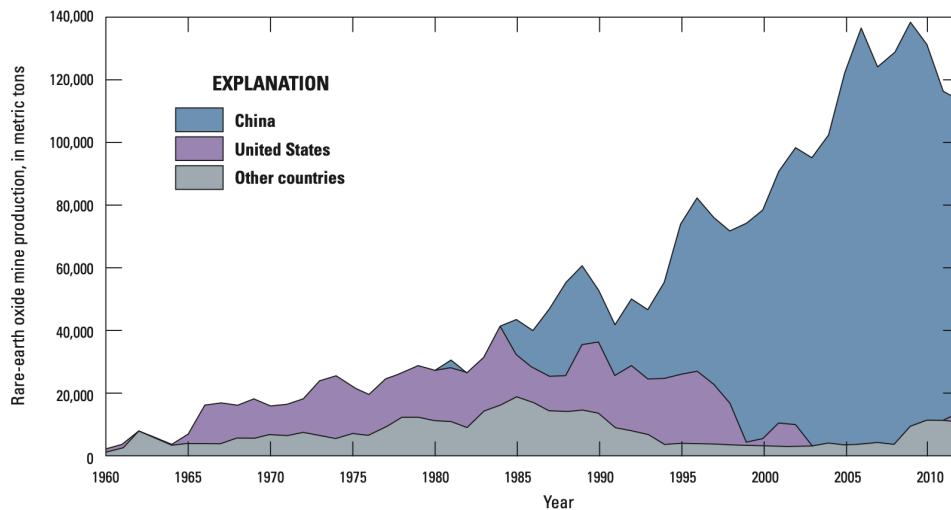


Figura 3.7: Producción mundial de óxidos de tierras raras entre el año 1960 y el 2012. Extraído de (U.S. Geological Survey, 2017).

Durante el año 2010, China comienza a imponer cuotas, licencias e impuestos, acusando limitaciones en la cantidad de REE producidas para sus requerimientos propios. Estas nuevas imposiciones provocaron nuevas inversiones en lugares fuera de China, tal como se observa en la Figura 3.8, fomentando la exploración de este tipo de elementos y promoviendo el reciclaje, conservación e investigación de otros sustitutos a estos elementos (U.S. Geological Survey, 2017).

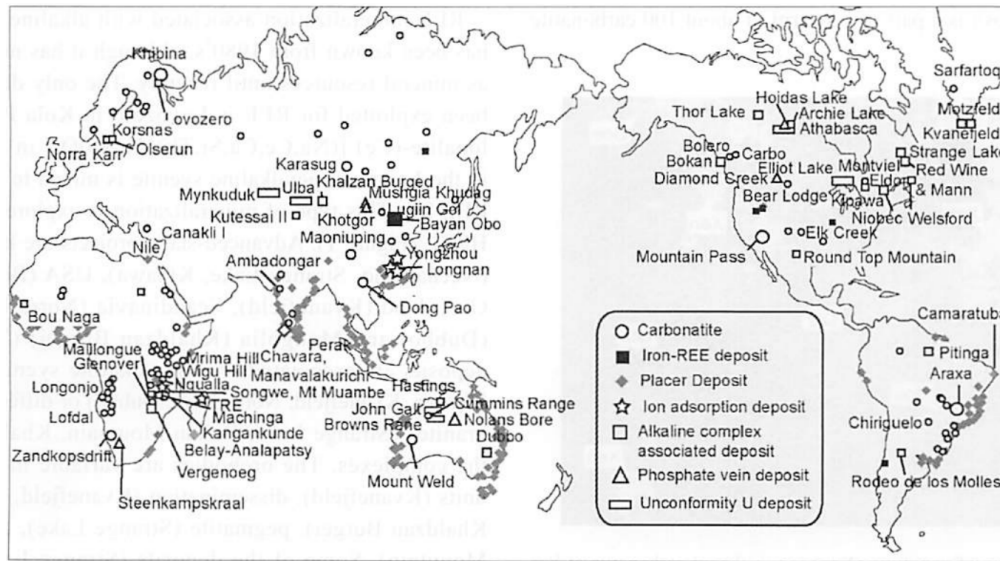


Figura 3.8: Principales proyectos de exploración y explotación de REE. Extraído de Watanabe, 2014.

Dadas estas nuevas restricciones, el precio de estos elementos creció de forma considerablemente durante los años 2010 y 2011. Esto también acompañado por la creciente utilización de estos elementos para la producción de energías no convencionales y su uso para distintos artículos tecnológicos (Figura 3.8).

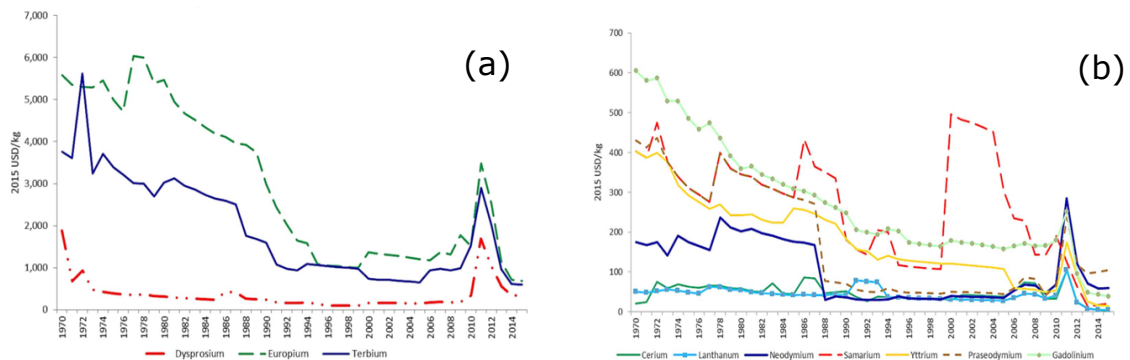


Figura 3.9: Mercado de tierras raras pesadas (a) y tierras raras livianas (b) con sus precios desde el año 1970 al 2015. Extraído de (Fernandez, 2017).

Se pronostica que las REE seguirán siendo fundamentales a futuro, dado que aportarán mejoras en nivel de rendimiento, tamaño y eficiencia en los productos en las cuales son utilizadas. En este sentido, elementos como el Nd, Pr y menor medida Dy podrían pasar a ser las tierras raras más críticas en términos de oferta y demanda. Se preveía que la demanda de óxido de Neodimio y óxido de Praseodimio aumentara un 4,7 % anual entre 2016 y 2026, mientras que la demanda de óxido de Disprosio

aumentara un 5 % anual. El uso de tierras raras en otras aplicaciones como vidrios, iluminación y cerámica avanzada seguirá siendo vital para su rendimiento y crecimiento a futuro, aumentando la demanda de REE en total un 4,4% entre 2016 y 2026 alcanzando más de 190.000 t REO (Goodenough y otros, 2017). Ya en el año 2020, el mercado de tierras raras alcanzó las 240.000 t REO (ver Tabla 3.2), donde la mayor parte de la producción de estos elementos fue aportada por China. Para el año 2021, la producción de estos elementos alcanzó las 280.000 t (ver Tabla 3.2) (U.S. Geological Survey, 2022). Las reservas mundiales de estos elementos se estima en cerca de 125 Mt (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Producción de REE durante los años 2020 y 2021, seguido de las reservas de las principales productoras a nivel mundial. Modificado de (U.S. Geological Survey, 2022).

	Producción (ton)		Reservas (ton)
	2020	2021	
<i>Estados Unidos</i>	39.000	43.000	1.800.000
<i>Australia</i>	21.000	22.000	4.000.000
<i>Brasil</i>	600	500	21.000.000
<i>Birmania</i>	31.000	26.000	S/I
<i>Burundi</i>	300	100	S/I
<i>Canadá</i>	-	-	830.000
<i>China</i>	140.000	168.000	44.000.000
<i>Groenlandia</i>	-	-	1.500.000
<i>India</i>	2.900	2.900	6.900.000
<i>Madagascar</i>	2.800	3.200	S/I
<i>Rusia</i>	2.700	2.700	21.000.000
<i>Sudáfrica</i>	-	-	790.000
<i>Tanzania</i>	-	-	890.000
<i>Tailandia</i>	3.600	8.000	S/I
<i>Vietnam</i>	700	400	22.000.000
<i>Otros países</i>	100	300	280.000
Total mundial	~ 245.000	~ 280.000	~ 125.000.000

4 METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN

4.1 SELECCIÓN DE ZONAS A EXPLORAR

Para el presente estudio, se seleccionó la Cordillera de Nahuelbuta, que corresponde a un sector específico de la Cordillera de la Costa en Concepción. La selección de esta área para el estudio se debe a que se encuentran unidades geológicas con potencial para formar depósitos del tipo REE-HR, al comparar su litología con otros proyectos alrededor del mundo, además de desarrollo de proyectos de este tipo de depósitos dentro del área de estudio. La técnica de muestreo corresponde a la toma de muestras puntuales en taludes, en caso de ser posible, donde cada muestra en un mismo talud era tomada con distancia de 1 m en la vertical (ver Figura 4.1), lo cual permite estudiar los distintos horizontes de meteorización que se pueden presentar en profundidad y corroborar distintos estados de enriquecimiento de REE.



Figura 4.1: Metodología del muestreo de taludes.

La toma de muestras se realizó en dos campañas, la primera durante diciembre del año 2021 y la segunda en febrero de 2022. La primera campaña consistió en un muestreo de sectores aleatorios. Durante esta misma campaña y con el fin de lograr una comparación entre zonas nuevas y zonas previamente exploradas, se realiza un muestreo y aplicación de la metodología de exploración a áreas declaradas como zonas de explotación en el proyecto de Aclara. Esto tiene como finalidad tener una base comparativa de los resultados y así ver el potencial de la metodología. En la primera campaña se lograron recolectar 56 muestras.

La segunda campaña de terreno consiste en un muestreo más detallado cerca de la muestra M09 obtenida durante la primera campaña de terreno en un sector cercano a El Queule, en el camino que conecta la Autopista Concepción-Cabrero con Hualqui. El muestreo más detallado de este sector se debe a los buenos resultados que se obtuvieron al medir mediante fluorescencia portátil de rayos X, específicamente en los elementos Nd y Pr. Durante esta segunda campaña se lograron recolectar 83 muestras, totalizando 139 muestras en ambas campañas.

4.2 ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA PORTATIL DE RAYOS X

Para el primer método de análisis, que corresponde al uso de Fluorescencia Portátil de Rayos X (pXRF), se definió un proceso de secado, homogenización y medición de concentración de elementos para cada muestra tomada. Este método es utilizado de manera cualitativa y con el fin de determinar si existe o no presencia de elementos de tierras raras, con el objetivo de disminuir los costos que implica llevar todas las muestras a un análisis en laboratorio. En este sentido, aquellas muestras que presenten las mayores concentraciones de REE serán estudiadas de manera posterior en laboratorio.

La fluorescencia portátil de rayos X corresponde a una técnica analítica económica y bastante rápida, que permite la recolección de una gran cantidad de elementos. Funciona de tal forma que excita los átomos de la muestra, lo que hace que los electrones se desplacen desde las orbitas interiores hacia las exteriores, lo cual genera que se emita una radiación electromagnética equivalente a la diferencia de energía entre cada una de estas orbitas. Esta longitud de onda es única para cada elemento y su intensidad es proporcional a la concentración de este (Bustos, 2020). En

este caso, el equipo utilizado corresponde al modelo Niton XL3t, el cual tiene instalado el módulo de tierras raras que permite medir los elementos Y, La, Ce, Pr y Nd.

Para realizar una medición correcta de los elementos presentes, es necesario generar una metodología que reduzca algunos de los efectos que producen variabilidad en la precisión de los resultados, como lo son el efecto de la humedad, de la granulometría, del contenedor y espesor de la muestra, además del tiempo de análisis. En este sentido, para reducir las variaciones que se puedan provocar al utilizar la pXRF se toma en cuenta lo siguiente (Figura 4.2):

1. El secado se realiza en un horno de convección a 150°C durante dos horas, esto tiene como finalidad reducir la distorsión provocada por la humedad. En ese sentido, según Parsons y colaboradores (2012) un 1% de aumento en la humedad del suelo implica una subestimación de entre un 1.15 a 1.75%.
2. Se pulverizan las muestras hasta lograr una granulometría suficientemente fina, la cual debe ser por lo menos un 97% bajo 2,8 mm. En este caso la granulometría es aproximadamente 100% pasante malla #20, gracias a la utilización de un pulverizador. El paso de las muestras por un proceso de pulverizado también tiene relación con lograr la mejor homogenización posible de esta, minimizando los efectos de la heterogeneidad asociados con la variación del tamaño de grano y un posible efecto pepita (Fisher y otros, 2014).
3. Se utiliza como contenedor de las muestras pulverizadas bolsas de polietileno de baja densidad, en este caso similares a "*bolsas de helado*". Según Bustos (2020) este tipo de bolsas entregan resultados similares al film poliéster Mylar® de 6µm recomendado por Fisher y colaboradores (2014), que considera entrega los mejores resultados.
4. Al preparar las muestras y dejarlas dentro de su bolsa contenedora, se considera que ésta tenga más de 1 cm de espesor.
5. El tiempo de análisis con la pXRF será de 60 segundos, tiempos mayores a esto no muestran grandes variaciones de resultados.

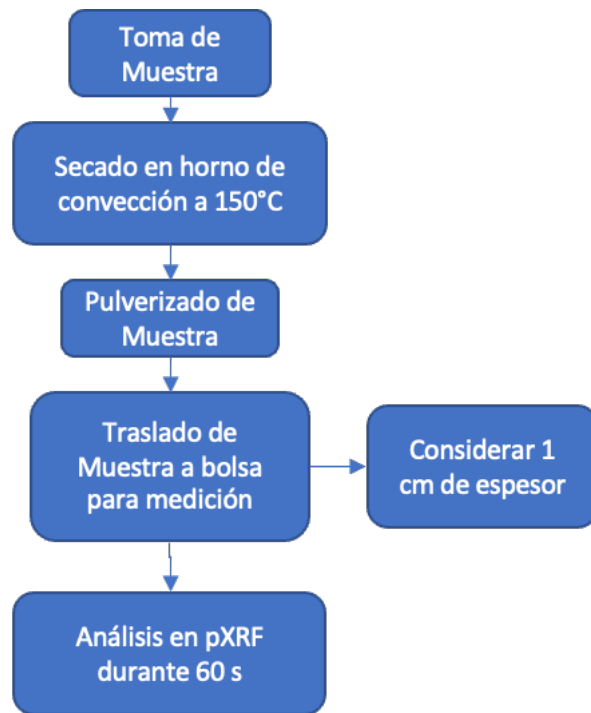


Figura 4.2: Diagrama de la metodología utilizada para la preparación de la muestra mediante análisis de fluorescencia portátil de rayos X.

4.3 ANÁLISIS ICP-MS EN LABORATORIO

La espectrometría masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) es un método altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla (Universidad de Burgos, 2022). Este tipo de análisis tiene una mayor sensibilidad y límites de detección más bajo comparado al uso de la fluorescencia portátil de rayos X (pXRF), por lo que sirve como base de comparación y calibración de este tipo de análisis.

El uso del ICP-MS es posterior al realizado mediante pXRF y se utiliza en dos oportunidades: para el análisis de roca total, con el fin de conocer la concentración total de REE en cada muestra, y para el análisis de la fracción intercambiable de REE de estas, lo cual determina la porción recuperable económicamente. Para este estudio, solo se han considerado los resultados obtenidos para las concentraciones totales de REE.

Este tipo de análisis son realizados en laboratorio, dado el equipo que se utiliza para realizarlo, además de la preparación especial de este tipo de muestras. Para este análisis se ha utilizado Metaborato/Tetraborato de

Litio como fundente, el cual permite recuperar entre el 98 y 101% de las REE presentes en este tipo específico de muestras de arcillas.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO, GEOQUÍMICO Y GEOMORFOLÓGICO DE DATOS

Una vez analizadas estas muestras por el método de fluorescencia portátil de rayos X y por ICP-MS, se realiza un análisis Estadístico, Geoquímico y Geomorfológico de los datos utilizando como base ambos resultados.

En primer lugar se realiza el estudio estadístico de los resultados obtenidos mediante ambos métodos. Esto tiene como objetivo mostrar que tan distante están los resultados obtenidos mediante pXRF, método de análisis inicial y cualitativo, con los resultados obtenidos mediante ICP-MS, método más confiable y cuantitativo. Esto se hace mediante tablas de correlación y *Scatter Plots*, que permitan mostrar que tan cercanos son los resultados.

Posterior a esto, se realiza un estudio geoquímico de los resultados, obtenidos por ICP-MS. Para esto se normalizan las concentraciones obtenidas por este método a condrito, tomando como referencia el valor de condrito utilizado por McDonough y Sun (1995). Además se calculan una serie de radios geoquímicos propuestos por Bustos (2020), esto con el fin de analizar las singularidades de los taludes estudiados en cada punto. Para detectar las anomalías de Cerio (Ce/Ce*) y Europio (Eu/Eu*) se utilizan las fórmulas para el estudio de depósitos de REE-HR:

$$\frac{Ce}{Ce^*} = \frac{Ce_N}{(La_N * Gd_N)^{0.5}}$$

$$\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_N}{(Sm_N * Gd_N)^{0.5}}$$

Para el análisis del grado de fraccionamiento entre HREE y LREE se utiliza la prevalencia de cada grupo según una serie de radios geoquímicos:

$$\left(\frac{La}{Yb}\right)_N = \frac{La_N}{Yb_N}$$

$$\left(\frac{La}{Sm}\right)_N = \frac{La_N}{Sm_N}$$

$$\left(\frac{La}{Gd}\right)_N = \frac{La_N}{Gd_N}$$

$$\left(\frac{Gd}{Yb}\right)_N = \frac{Gd_N}{Yb_N}$$

$$\left(\frac{Y}{Ho}\right)_N = \frac{Y_N}{Ho_N}$$

Una vez hecho esto, se procede a realizar análisis geomorfológico de este, mediante el apoyo del software *QGIS* y siguiendo la metodología mostrada en la Figura 4.3. Se analiza la posición espacial de cada muestra y se realizan mapas con la elevación, pendiente, aspecto, curvatura, litología y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), en cada punto muestreado.

Las características utilizadas para el análisis fueron seleccionadas dado que podrían tener cierta influencia en el desarrollo de regolitos y por tanto, el enriquecimiento de REE en aquellas zonas.

En ese sentido, la elevación podría influenciar de distintas formas, si el lugar muestreado está en zonas más altas el clima podría ser distintos a aquellas zonas más bajas, o las rocas que afloran podrían ser distintas.

Por otra parte, el grado de la pendiente puede influir en el desarrollo y el grosor del perfil de meteorización, dado que es más fácil desarrollar regolitos más gruesos cuando la pendiente es menor.

El aspecto, u orientación, podría afectar a la forma que el sol le llega. Por ejemplo, en el hemisferio sur aquellas laderas que dan hacia el norte suelen recibir más sol que aquellas que apuntan al sur, este efecto podría producir que la humedad en las partes superiores del regolito afecten de forma distinta según la orientación.

La curvatura se estudia dado que aquellas zonas cóncavas tenderían a ser zonas de acumulación de sedimentos, mientras que aquellas zonas convexas zonas potencialmente más sensibles a la erosión y meteorización. Estos efectos podrían producir zonas más propensas al desarrollo de perfiles de meteorización.

La litología es un factor que afecta bastante este tipo de mineralizaciones. La bibliografía indica que aquellas zonas donde se encuentran rocas intrusivas graníticas son aquellas que suelen generar este tipo de depósitos, mientras que las otras litologías no tendrían el potencial de hacerlo.

Por último, se analiza la vegetación mediante el NDVI, esto se hace debido a que podría ocurrir que ciertas vegetaciones sean más propensas a crecer en distintos tipos de suelos, que podrían calzar con los suelos donde analizados para encontrar potenciales zonas de mineralización. Para realizar este análisis se adaptó una clasificación propuesta por Ya'acob y colaboradores (2014), quedando las clases de la siguiente forma:

Tabla 4.1: Valores de referencia para las clases ocupadas en el análisis por NDVI.

	<i>Áreas representadas</i>	<i>Valores NDVI</i>	<i>Valores NDVI (X)</i>
Clase 1	Agua	Valores negativos	$-1 < X \leq -0.1$
Clase 2	Roca, Arena y Nieve	Valores cercanos a cero	$-0.1 < X \leq 0.1$
Clase 3	Vegetación Intermedia	Valores poco positivos	$0.1 < X \leq 0.4$
Clase 4	Vegetación Densa	Valores cercanos a uno	$0.4 < X \leq 1$

Mediante el apoyo del software *QGIS*, se realizan comparaciones de la posición de cada muestra para cada característica. Con esto se puede tener el valor de cada uno de los atributos anteriores en ese punto para todas las muestras, generando así tablas donde se compara el valor en cada punto con la concentración total de tierras raras (REO). Cabe destacar que para datos obtenidos mediante pXRF, el valor de REO corresponde solo a la suma de los 5 elementos detectados por este método (Y, La, Ce, Nd y Pr), por lo que se simboliza como REO5, mientras que para el método de ICP-MS el valor de REO corresponde a la suma de los 15 elementos detectados por este método, es decir, los 17 elementos considerados REE menos el escandio y prometio.

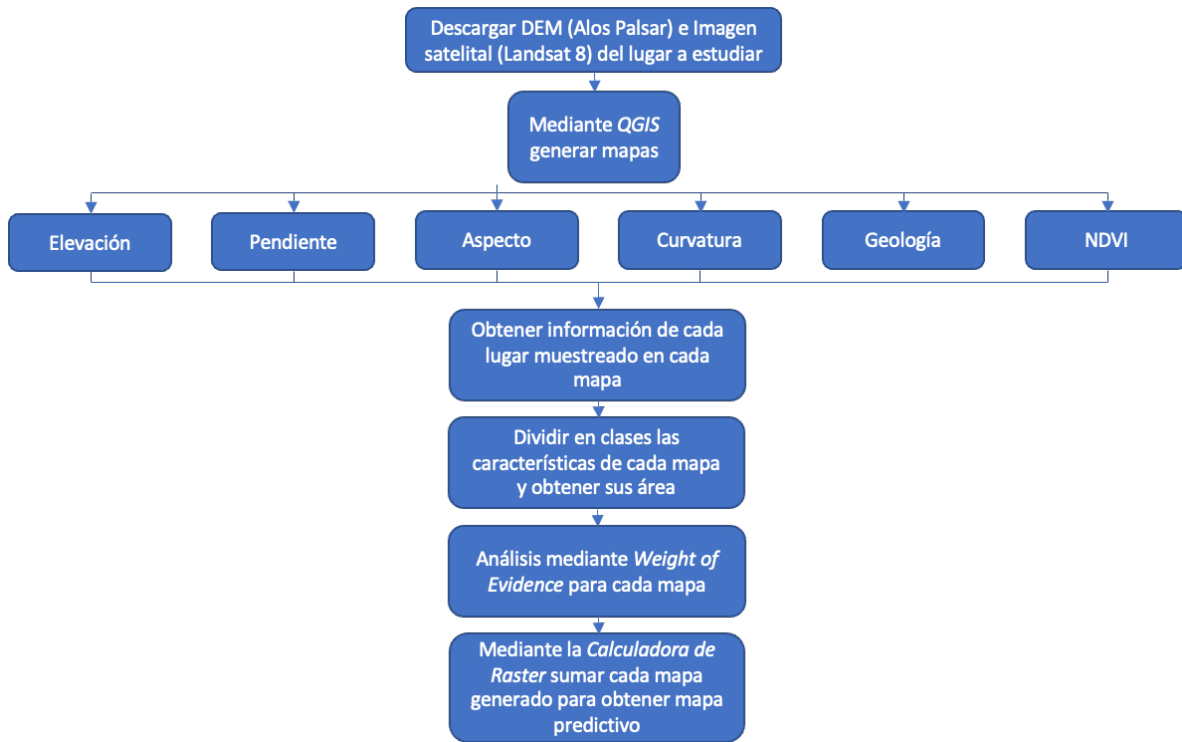


Figura 4.3: Metodología para el cálculo del Weight of Evidence.

Con estos datos, se realiza un modelo predictivo de mineralización mediante el método del “peso de la evidencia” (*Weight-of-evidence* o *WofE*, por sus siglas en inglés), el cual utiliza el modelo bayesiano de probabilidad y es aplicado para la evaluación del potencial de zonas mineralizadas (Lee y otros, 2002). Este método evalúa una serie de factores distintos y los pondera, de forma de generar un modelo predictivo de mineralización de REE, el cual podría indicar que zonas priorizar para una futura campaña de exploración. Para esto, se genera una tabla para cada muestra, donde se tiene:

1. *Clase*: Representa la clase analizada, por ejemplo, en el caso de mapas de pendiente, una clase podría ser aquellas áreas donde se presentan sectores con pendientes entre 0° y 10°.
2. *Ocurrencia*: Corresponde a la cantidad de veces que ocurre lo buscado en una clase dada, por ejemplo, la cantidad de veces que se presentan muestras con mineralización sobre 200 ppm.
3. *Porcentaje de Ocurrencia*: Corresponde a la probabilidad de encontrar una ocurrencia en la clase, se calcula mediante

$$\% \text{ Ocurrencia} = \frac{\text{Numero de Ocurrencias en la clase}}{\text{Total de Ocurrencias}} * 100$$

4. *Área*: Corresponde al área que hay en la clase. En el caso particular del estudio, el área se mide en hectáreas.
5. *Porcentaje del área*: Corresponde a la probabilidad de que el lugar analizado esté dentro de la clase. Se calcula mediante:

$$\% \text{ Area} = \frac{\text{Hectáreas de la clase dada}}{\text{Total de hectáreas analizadas}} * 100$$

6. *Ratio W⁺*: Corresponde a la división entre el porcentaje de Ocurrencia y el porcentaje del área estudiada para cada clase.

$$\text{Ratio } W^+ = \frac{\% \text{ Ocurrencia}}{\% \text{ Áreas}}$$

7. *Ratio W⁻*: Corresponde a la división entre porcentaje de no encontrar una muestra en la clase dada y el porcentaje de no que el área analizada no esté dentro de la clase. Se calcula:

$$\text{Ratio } W^- = \frac{(100 - \% \text{Ocurrencia})}{(100 - \% \text{Área})}$$

8. *W⁺*: Es la probabilidad de encontrar una ocurrencia en la clase sobre la probabilidad de encontrarla en la clase dada. Se calcula mediante:

$$W^+ = \ln(\text{Ratio } W^+)$$

9. *W⁻*: Corresponde a lo contrario de W⁺, es decir, es la probabilidad de no encontrar la ocurrencia ni de encontrarse en la clase dada, se calcula como:

$$W^- = \ln(\text{Ratio } W^-)$$

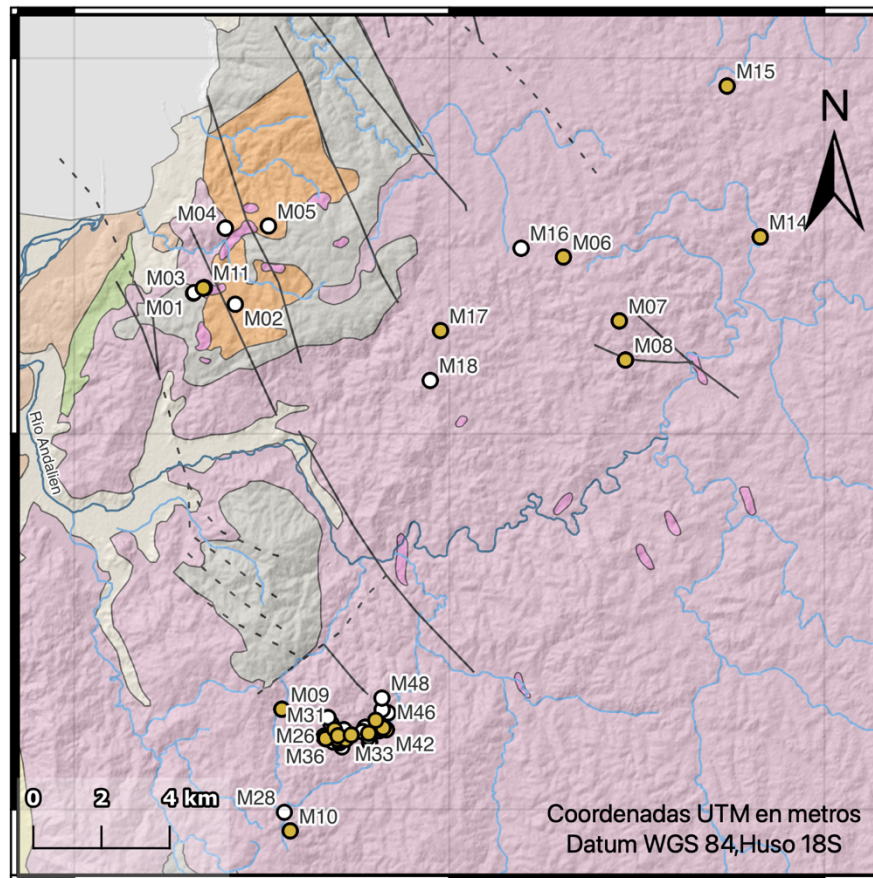
10. *Contraste (C)*: Es la resta entre W⁺ y W⁻, quiere decir que tan probable es encontrar una ocurrencia dada la clase. En este caso, mientras más positivo sea el resultado más favorable es que se encuentre.

$$C = W^+ - W^-$$

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL MUESTREO

En total se tomaron 139 muestras distribuidas en 56 puntos distintos, lo cual se ilustra en la Figura 5.1. Para esto se realizaron dos campañas de terreno, completando 10 días efectivos de terreno entre diciembre de 2021 y febrero de 2022.



LEYENDA Y SIMBOLOGÍA

○ Muestras analizadas mediante pXRF	Fallas	Rocas Metamórficas	■ Kq Formación Quiriquina
● Muestras enviadas a laboratorio	- - - Inferida	■ SE Serie Oriental	Batolito de la Costa
Red Hidrográfica	— Observada	Rocas Estratificadas	■ Granito de Biotita
— Estero		■ Hstf Sedimentos de Terraza Fluvial	■ Dioritas
— Río		■ PIHstm Sedimentos de Terraza Marina	■ Granitoide de Granate
		■ Ec Formación Curanilahue	

Figura 5.1: Ubicación muestras tomadas durante las campañas de terreno realizadas. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

Como se puede ver de la Figura 5.1, las muestras extraídas se encuentran sobre el batolito de la costa, principalmente sobre las subunidades Granito de Biotita, Diorita y Granitoide de Granate. Esto tiene estrecha relación con el tipo de mineralización que se está buscando, asociada a la meteorización y alteración de rocas ígneas. Lo mismo ocurre en las muestras M11 y M13 (cerca de Penco), las cuales están dentro de la zona de extracción definida por Aclara (2021), lo cual nos permite tener una idea del comportamiento que pueden tener estas muestras en profundidad, dado que las muestras extraídas solo corresponden a un muestreo superficial.

En ese sentido, Aclara (2021) declara tener cinco zonas de extracción en su informe (Victoria Norte y Sur, Luna, Alexandra y Maite (Aclara, 2021)), de las cuales las muestras superficiales extraídas en esta oportunidad corresponden al sector de Victoria Sur. En su informe Aclara (2021) declara leyes de hasta 1639 ppm de tierras raras totales más itrio. En el muestreo superficial realizado en este estudio, se tienen leyes máximas de tierras raras e Itrio de hasta 295 ppm, medido en laboratorio mediante análisis ICP-MS (Anexo B), lo cual podría indicar un enriquecimiento en profundidad para este tipo de depósitos, lo cual calza con el modelo de mineralización indicado para las tierras raras hospedadas en regolitos.

Por otra parte, a las 139 muestras se le realizó análisis con fluorescencia de rayos X, siguiendo la metodología descrita anteriormente, recuperando alrededor de 1138 datos de concentraciones de elementos, dado que se hicieron aproximadamente 8 mediciones por cada muestra utilizando este método de análisis. Las REE medidas a través de este método corresponden a Neodimio (Nd), Praseodimio (Pr), Cerio (Ce), Lantano (La) e Itrio (Y). Para el análisis de estos resultados se utilizó el promedio simple de cada una de las mediciones para cada muestra (los valores y lugares no son expuestos en esta memoria por temas de confidencialidad). Posterior al análisis pXRF, aquellas muestras que mostraron concentraciones más alta de Nd y Pr, elegidos al ser los elementos críticos más relevantes que logra medir la pXRF, fueron enviadas a laboratorio, completando 55 muestras analizadas mediante ICP-MS para obtener su concentración total de REE (los valores y lugares no son expuestos en esta memoria por temas de confidencialidad).

Los valores de estas muestras varían según el tipo de análisis utilizado, donde se tienen valores que sobrepasan los 2000 ppm para la fluorescencia portátil de rayos X, mientras que para ICP-MS no se tienen valores superiores a los 400 ppm, como se muestra en los gráficos de la Figura 5.2.

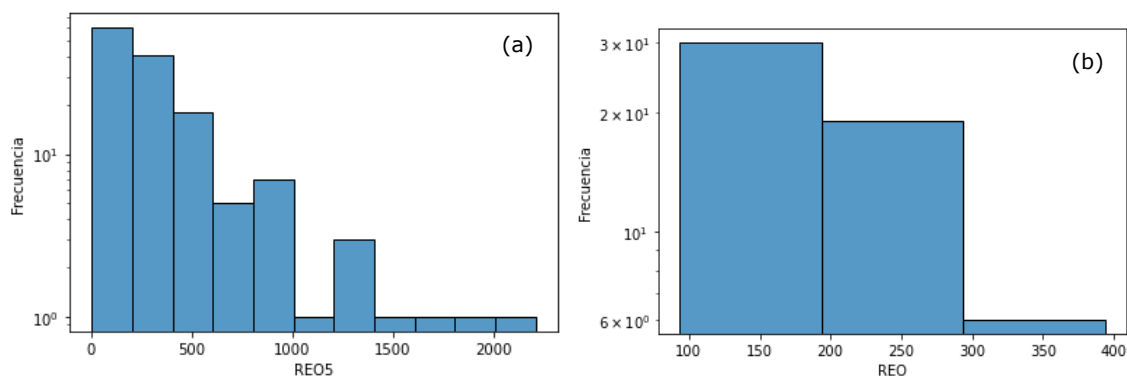


Figura 5.2: Histogramas para la suma total de REE para cada método de análisis utilizado: (a) Análisis mediante pXRF con la suma de los 5 elementos medidos. (b) Suma de los 15 elementos medidos mediante ICP-MS.

Una vez obtenidos los resultados mediante ambos métodos, se realiza una matriz de correlación (Tabla 5.1) con el fin de observar que elementos tienen los resultados más distintos al variar el método de análisis. En este caso, utilizamos el coeficiente de correlación lineal entre dos variables, la cual tiene valores entre -1 y 1, donde si se tiene una correlación directa los valores son positivos y cercanos a unos, en el caso de que sea una correlación indirecta los valores son negativos y cercanos a -1, mientras que los valores más cercanos a 0 son aquellos donde los datos no se correlacionan de ninguna forma y por tanto no son similares ni comparables.

Tabla 5.1: Matriz de correlación de resultados de REE de ICP-MS con REE y elementos mayoritarios analizados mediante fluorescencia portátil de rayos X. Valores en verde son más cercanos a uno, en amarillo cercanos a cero y en rojo valores negativos.

	Nd pXRF	Pr pXRF	Ce pXRF	La pXRF	Y pXRF	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Y	Yb	REE	HREE	LREE	
Nd pXRF	1,00																							
Pr pXRF	0,91	1,00																						
Ce pXRF	0,85	0,82	1,00																					
La pXRF	0,87	0,85	0,80	1,00																				
Y pXRF	0,44	0,44	0,45	0,61	1,00																			
Ce	0,40	0,38	0,68	0,45	0,49	1,00																		
Dy	0,46	0,46	0,46	0,61	0,96	0,51	1,00																	
Er	0,47	0,47	0,47	0,61	0,96	0,49	0,98	1,00																
Eu	-0,09	-0,19	0,04	0,13	0,35	0,44	0,36	0,28	1,00															
Gd	0,43	0,41	0,45	0,57	0,85	0,63	0,91	0,83	0,52	1,00														
Ho	0,41	0,41	0,42	0,57	0,97	0,48	0,99	0,99	0,34	0,85	1,00													
La	0,49	0,42	0,53	0,65	0,72	0,67	0,75	0,69	0,56	0,88	0,69	1,00												
Lu	0,39	0,40	0,43	0,55	0,94	0,47	0,93	0,97	0,27	0,75	0,96	0,63	1,00											
Nd	0,24	0,18	0,35	0,42	0,64	0,68	0,69	0,60	0,73	0,88	0,63	0,93	0,55	1,00										
Pr	0,28	0,22	0,37	0,47	0,66	0,67	0,70	0,63	0,71	0,88	0,65	0,95	0,57	1,00	1,00									
Sm	0,34	0,30	0,39	0,49	0,73	0,67	0,79	0,70	0,63	0,96	0,73	0,92	0,63	0,96	0,96	1,00								
Tb	0,31	0,30	0,31	0,49	0,94	0,49	0,97	0,93	0,48	0,93	0,96	0,76	0,89	0,75	0,76	0,85	1,00							
Tm	0,47	0,48	0,48	0,59	0,93	0,49	0,95	0,98	0,24	0,79	0,97	0,64	0,95	0,55	0,56	0,66	0,90	1,00						
Y	0,45	0,46	0,45	0,60	0,97	0,48	0,99	0,99	0,28	0,86	0,99	0,72	0,96	0,63	0,65	0,74	0,95	0,96	1,00					
Yb	0,48	0,47	0,49	0,61	0,95	0,47	0,96	0,99	0,24	0,78	0,97	0,67	0,98	0,56	0,59	0,65	0,89	0,96	0,98	1,00				
REE	0,45	0,41	0,59	0,60	0,79	0,85	0,83	0,78	0,58	0,92	0,79	0,93	0,73	0,92	0,92	0,93	0,83	0,75	0,79	0,75	1,00			
HREE	0,46	0,46	0,46	0,61	0,97	0,51	0,99	0,99	0,32	0,89	0,99	0,74	0,95	0,67	0,69	0,77	0,96	0,96	1,00	0,97	0,82	1,00		
LREE	0,42	0,36	0,59	0,55	0,66	0,89	0,70	0,64	0,61	0,85	0,65	0,92	0,59	0,93	0,93	0,91	0,71	0,61	0,65	0,61	0,98	0,69	1,00	

A partir de los resultados obtenidos en la matriz de correlación, podemos ver específicamente como se relacionan los elementos medidos por fluorescencia de rayos X (los cuales solo corresponden a Y, La, Ce, Pr y Nd) con los mismos elementos medidos en laboratorio mediante ICP-MS.

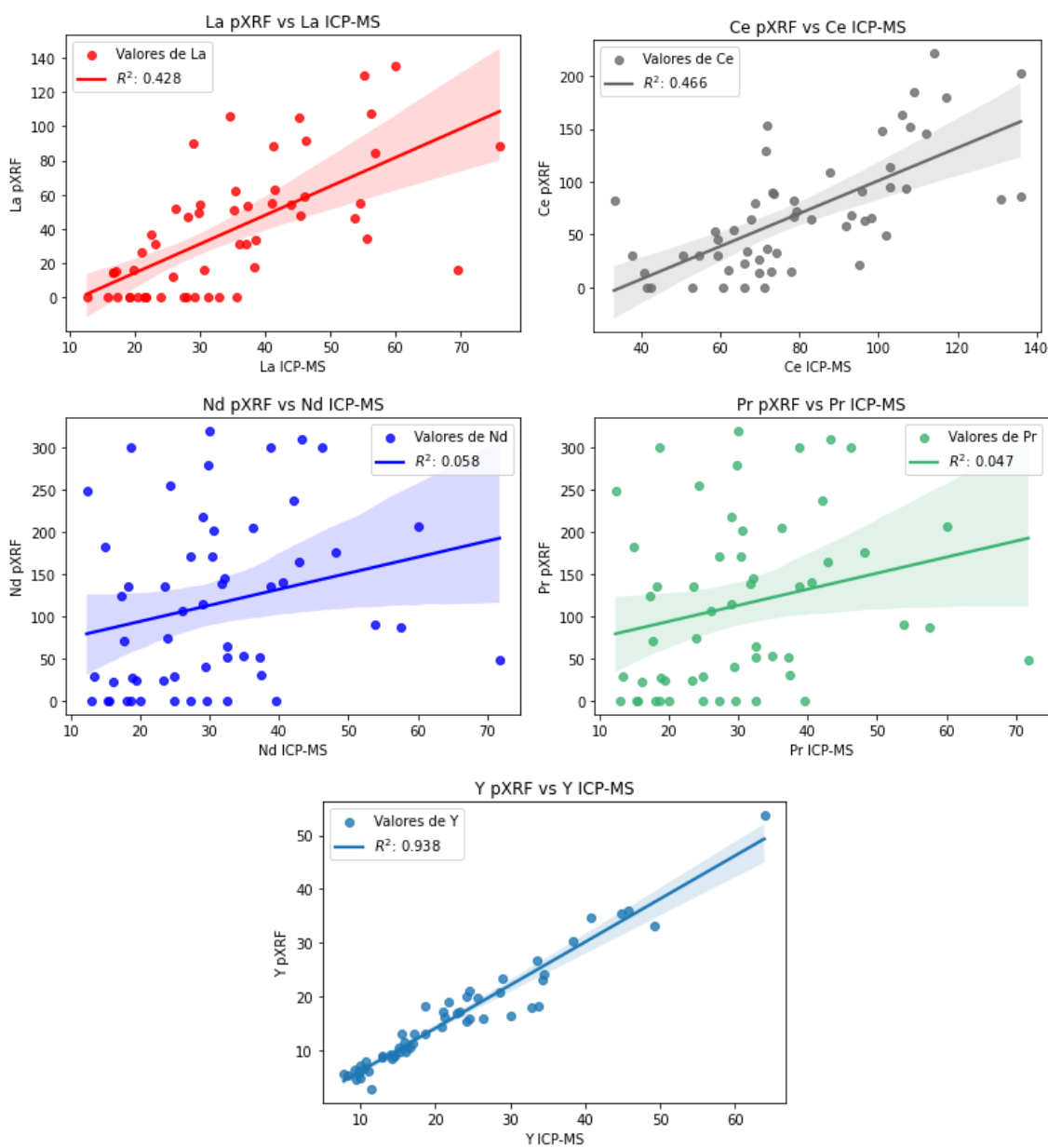


Figura 5.3: *Scatter plots* de correlación para resultados obtenidos en laboratorio y resultados obtenidos por fluorescencia portátil de rayos X.

En este sentido, según lo observado en la Tabla 5.1, para las tierras raras medidas mediante ICP-MS tienen muy buena correlación entre ellas, lo cual calza con las similitudes físicas y químicas que tienen estos elementos, por lo que estos elementos suelen aparecer juntos en la corteza (Balaram, 2019).

Por otra parte, para los resultados obtenidos mediante fluorescencia de rayos X, medición que fue realizada después de la preparación de muestra explicada en la metodología de este estudio con el fin de reducir variaciones que podría traer este tipo de análisis, se puede notar que este método no es preciso en las mediciones de las concentraciones reales de REE, según lo expuesto en la Figura 5.3 y en la Tabla 5.1, sobre todo en elementos como Nd y Pr, donde su $R^2 = 0,1$ es muy similar a cero, indicando una nula o muy baja correlación. Para los casos del La y Ce, las mediciones parecen tener una mejor correlación con los resultados obtenidos en laboratorio, alcanzándose un R^2 cercano a 0,45 según los gráfico de dispersión, lo cual nos indica una leve mejoría para los análisis de estos elementos a pesar de ser un valor bastante errático.

Esto es indicador de que el método de fluorescencia portátil de rayos X tiende a sobreestimar las concentraciones de REE, sobre todo para elementos como el La, Nd y Pr que dadas sus similitudes entre los peaks energéticos detectados por la pXRF, suelen obtener resultados imprecisos y erróneos (Hall y otros, 2014).

Sin embargo, para el caso del Y, la correlación es casi 1, lo cual nos indica una muy buena correlación y por tanto, que el método de la fluorescencia portátil de rayos X para este elemento funciona.

Dado esto, estudios como el de Bustos (2020) o Thermo Scientific (2012) y Olympus (2020) en los manuales de uso de sus instrumentos de medición por fluorescencia portátil de rayos X, muestran que el Y es un elemento útil como rastreador de Tierras Raras y en especial, de tierras raras pesadas, tal como se observa en la Tabla 5.1 donde la correlación entre Y y el contenido total de tierras raras pesadas (HREE) medido por ICP-MS es casi 1, siendo altamente correlacionables. Con esto como antecedente, y al observar la buena correlación que tiene el Y medido mediante pXRF con el Y medido en laboratorio, podemos crear una curva de correlación que nos permita estimar de forma certera el potencial contenido de REE en la muestra analizada (Figura 5.4).

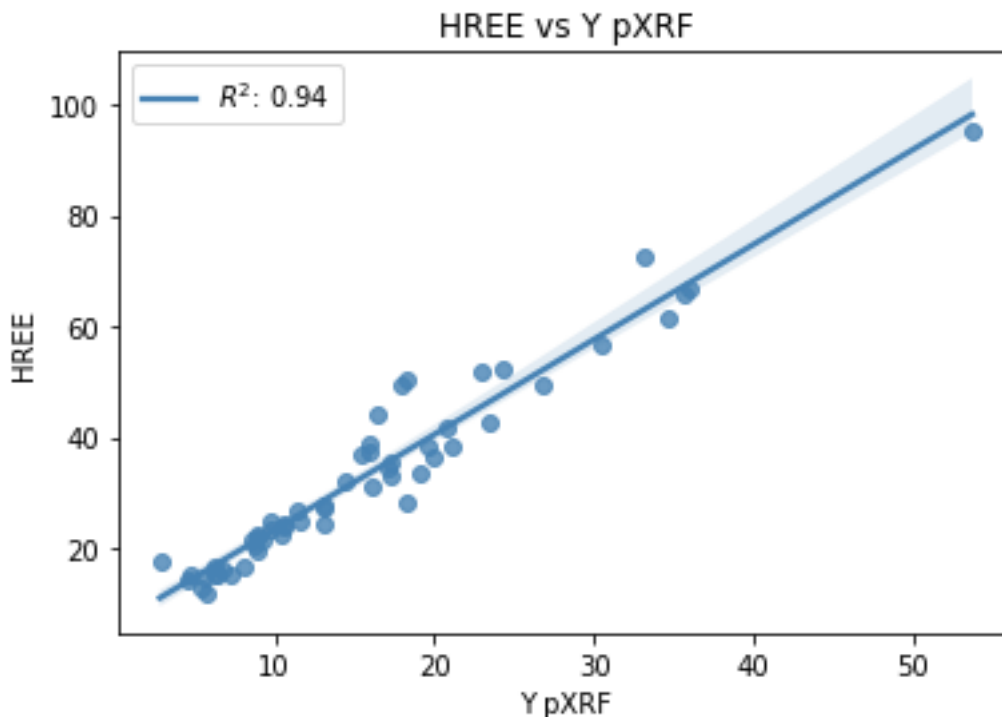


Figura 5.4: Scatter Plots de valores de Y obtenidos mediante ICP-MS y concentraciones totales de REE, HREE Y LREE

5.2 RESULTADOS GEOQUÍMICOS

Los resultados obtenidos mediante ICP-MS son normalizados a los valores de condrito utilizando los valores propuestos por McDonough & Sun (1995), expuestos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Valores de condrito propuestos por McDonouh & Sun (1995) para cálculo de normalización.

Elemento	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Y	Er	Tm	Yb	Lu
Condrito	0,237	0,613	0,093	0,457	0,148	0,056	0,199	0,036	0,246	0,055	1,57	0,16	0,025	0,161	0,025

A partir de estos valores ya normalizarlos, para cada elemento y muestra, se crea un *diagrama spyder* el cual nos permite analizar el grado de enriquecimiento de cada elemento y compararlo con los niveles promedio de la tierra, lo cual se observa en la Figura 5.5.

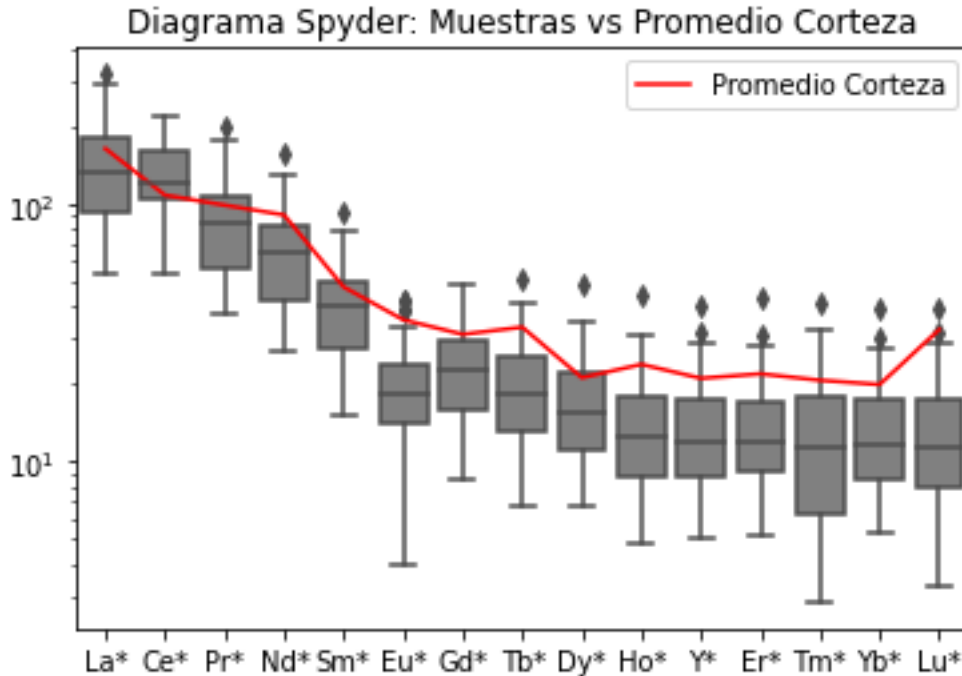


Figura 5.5: Concentración normalizada a condrito de las muestras analizadas mediante ICP-MS.

A partir de la Figura 5.5, podemos notar el comportamiento general de las muestras, donde el área gris representa las muestras y la línea roja el promedio de concentración de corteza de cada elemento. En este caso, podemos ver que el comportamiento varía de muestra a muestra en todos los elementos menos en el Europio, el cual está empobrecido en comparación al promedio de la corteza, lo cual puede estar relacionado a un empobrecimiento en plagioclasas del protolito del regolito, mineral que tiene a acumular Eu.

De modo general, podemos ver que los promedios de cada elemento tienen a ser menores en todos los casos, es decir, en la mayoría de los casos los elementos tienden a estar más concentrados en la corteza que en las zonas muestreadas. Esto puede deberse a que las muestras fueron tomadas en el horizonte superior, el cual suele encontrarse empobrecido en REE pero enriquecido en Ce. Otra de las razones por la cual puede ocurrir que los promedios sean menores a los valores de Corteza, es que es un espectro muy grande de comparación, por lo que lo correcto sería comparar con los valores del protolito de cada uno de los sectores donde se tomaron muestras.

Ahora, mediante el uso de los resultados por ICP-MS y la normalización a condrito, se pueden obtener una serie de ratios geoquímicos para conocer las singularidades de los lugares muestreados y conocer el grado de fraccionamiento entre HREE y LREE de ellos (Figura 5.6).

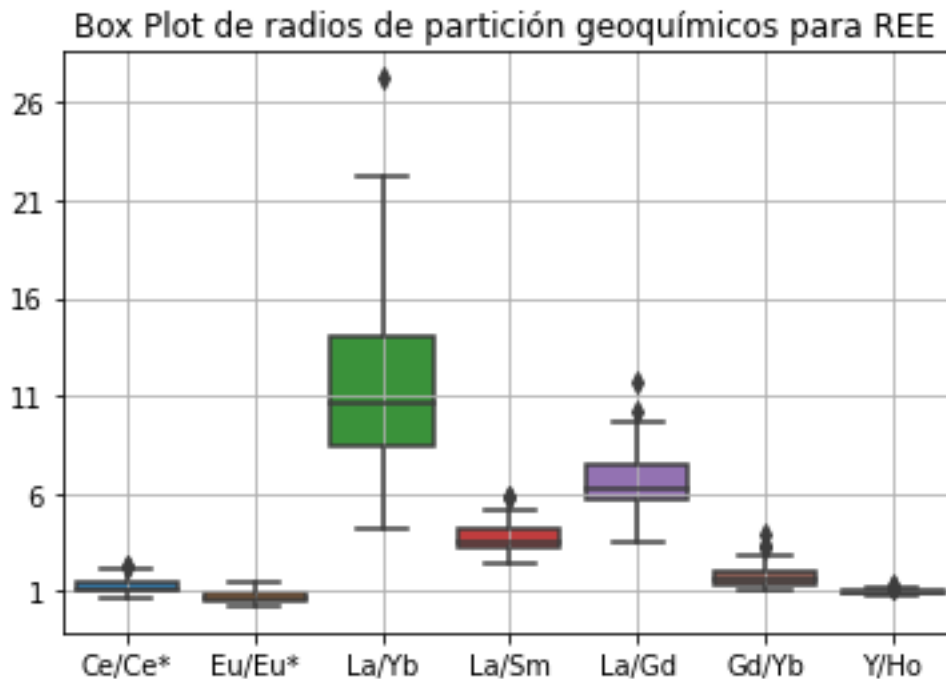


Figura 5.6: Boxplots para los ratios de fraccionamiento geoquímicos calculados.

A partir de la Figura 5.6, podemos notar el comportamiento general que tienen las muestras con respecto a grados de enriquecimiento de Ce y Eu, además de si el sector está más enriquecido en tierras raras livianas o pesadas. En ese sentido se tiene:

1. El cerio tiene un fraccionamiento cercano a uno, es decir, no se encuentra ni empobrecido ni enriquecido en los lugares muestreados. La anomalía de cerio es una variable importante de estudiar debido a que podría ocuparse como un indicador de potenciales zonas que podrían enriquecerse en profundidad. En este caso, al tener valores cercanos a uno es recomendable analizar los sectores muestra a muestra.
2. La anomalía de europio para todas las muestras tiende a ser menor a 1, indicando una posible génesis magmática empobrecida de plagioclasas que tienden a acumular este elemento.

3. Los radios geoquímicos de fraccionamiento comparan el nivel de enriquecimientos entre elementos. El radio La/Yb muestra el grado de enriquecimiento de LREE con respecto a las HREE, donde para las muestras tomadas en este caso se tienen valores muy superiores a 1, con sectores donde la predominancia de tierras raras livianas podría ser hasta 20 veces mayor en comparación a las tierras raras pesadas. Los radio La/Sm y La/Gd en cambio, muestran el grado de fraccionamiento entre las tierras raras más livianas (como el La) con respecto a las tierras raras livianas más pesadas (o llamadas tierras raras intermedias, como el Sm y el Gd), donde nuevamente las tierras raras livianas vuelven a parecer estar más enriquecidas que las intermedias. El caso Gd/Yb muestra el comportamiento entre las tierras raras intermedias con respecto a las pesadas, donde nuevamente se ve que las muestras no están tan enriquecidas en HREE dado que los valores para este radio son mayores a 1. Por último, el radio Y/Ho muestra el comportamiento del Itrio, que es un elemento que no pertenece al grupo de los lantánidos, con respecto a las tierras raras pesadas, grupo al cual se le asocia. En este caso podemos ver que el Y tiene un comportamiento muy similar a los otros elementos a los cuales se le asocia, es decir, que podría ser que la aparición de Y está relacionada a la aparición de HREE.

5.3 RESULTADOS ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

Una vez medidas estas muestras, se procede a realizar el análisis geomorfológico del área de estudio. Para ello es necesario definir las distintas clases en cada uno de las características a estudiar, por lo que se utilizan histogramas que permiten identificar la cantidad de familias que se pueden obtener en cada característica, para cada método análisis donde la Figura 5.7 corresponde a los resultados obtenidos mediante pXRF, mientras que la Figura 5.8 corresponde a los resultados obtenidos por ICP-MS. Estos histogramas se hacen a partir de *Python*, con los datos obtenidos en cada punto y permiten tener una idea de las clases y la cantidad de ocurrencias que pueden existir en cada una.

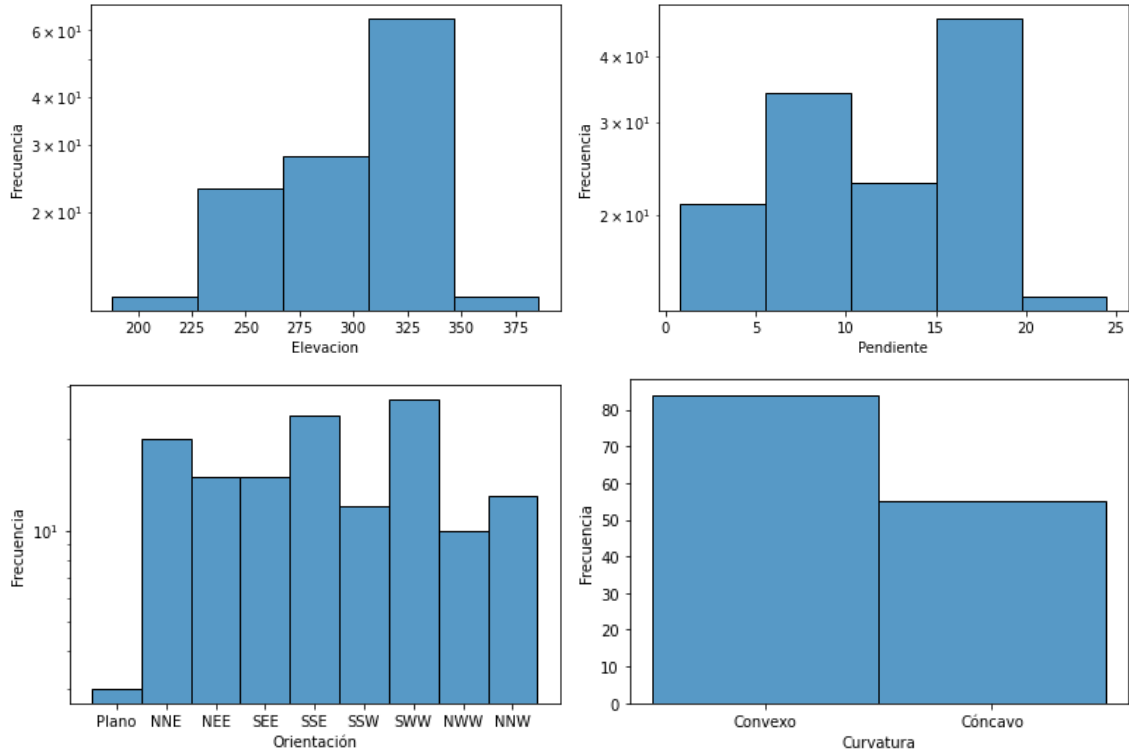


Figura 5.7: Histogramas para datos analizados en fluorescencia portátil de rayos X considerando Elevación, Pendiente, Orientación y Curvatura.

Para el caso de la pXRF (Figura 5.7), podemos notar que la elevación de las muestras está mayoritariamente entre los 225 y 350 metros, y que la pendiente no suele superar los 20° . Para el caso de la Orientación y la curvatura, las muestras fueron tomadas casi en partes iguales para esta característica.

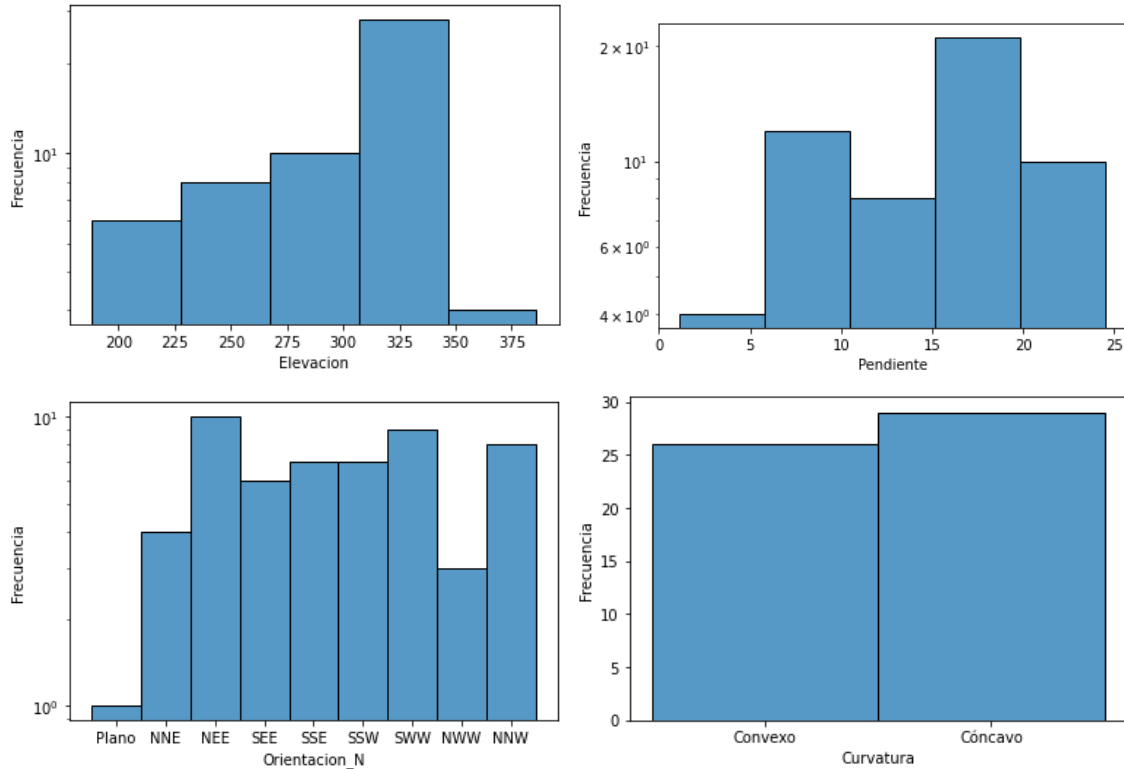


Figura 5.8: Histogramas para datos analizados mediante ICP-MS considerando Elevación, Pendiente, Orientación y Curvatura.

Para el caso de las muestras enviadas a laboratorio y analizadas mediante ICP-MS, se tiene que la elevación de las muestras se comporta de forma similar, concentrando muestras entre los 225 y 350 metros sobre el nivel del mar, lo mismo ocurre con la orientación y curvatura de las muestras, las cuales se distribuyen de manera similar. La pendiente en este caso si cambia, teniéndose que las muestras enviadas a laboratorio se concentran entre los 5 y 20°.

Además de estos histogramas, se calcula la función de probabilidad acumulada para ambos métodos, lo cual permite identificar las poblaciones que hay presentes en los lugares muestreados, para así identificar las leyes de corte a analizar mediante el método de pesos de la evidencia (Figura 5.9).

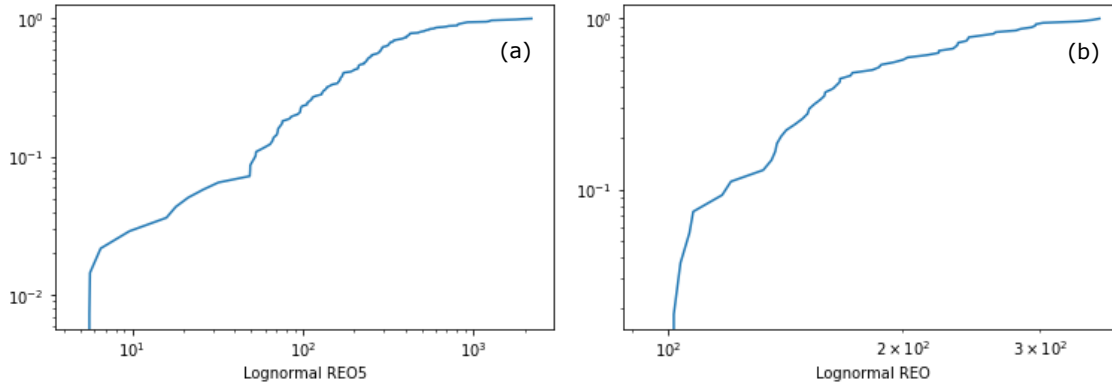


Figura 5.9: Funciones de probabilidad acumulada para las muestras (a) resultados obtenidos mediante pXRF y (b) resultados obtenidos mediante ICP-MS.

Los gráficos de función de probabilidad acumulada sirven para analizar las familias presentes en este tipo de mineralización y la distribución que tienen, al igual que ocurre en los histogramas. Para el caso de las muestras analizadas por fluorescencia de rayos X (Figura 5.10a), podemos observar 4 familias distintas de enriquecimiento de REE, basados en los quiebres que muestra la función de probabilidad. En el caso de las muestras analizadas mediante ICP (Figura 5.10b), también se logran diferenciar 4 familias, pero con valores máximos de REO bastante menores que a las analizadas mediante pXRF.

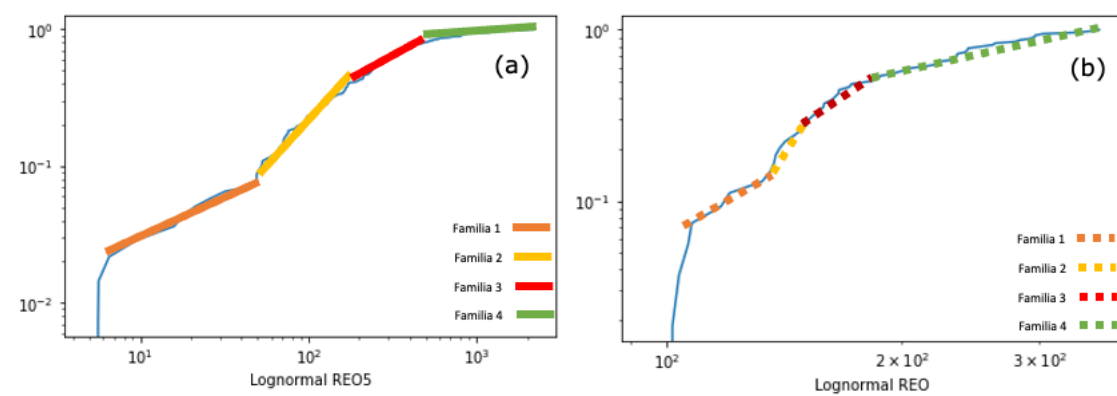


Figura 5.10: Funciones de probabilidad acumuladas y las familias que pueden ser reconocidas: (a) resultados obtenidos mediante pXRF y (b) resultados obtenidos mediante ICP-MS.

A partir de estos gráficos, cada característica puede ser diferencia en clases, con las cuales se generan una serie de mapas (Figura 5.11 y Figura 5.12) para el cálculo de los pesos de la evidencia.

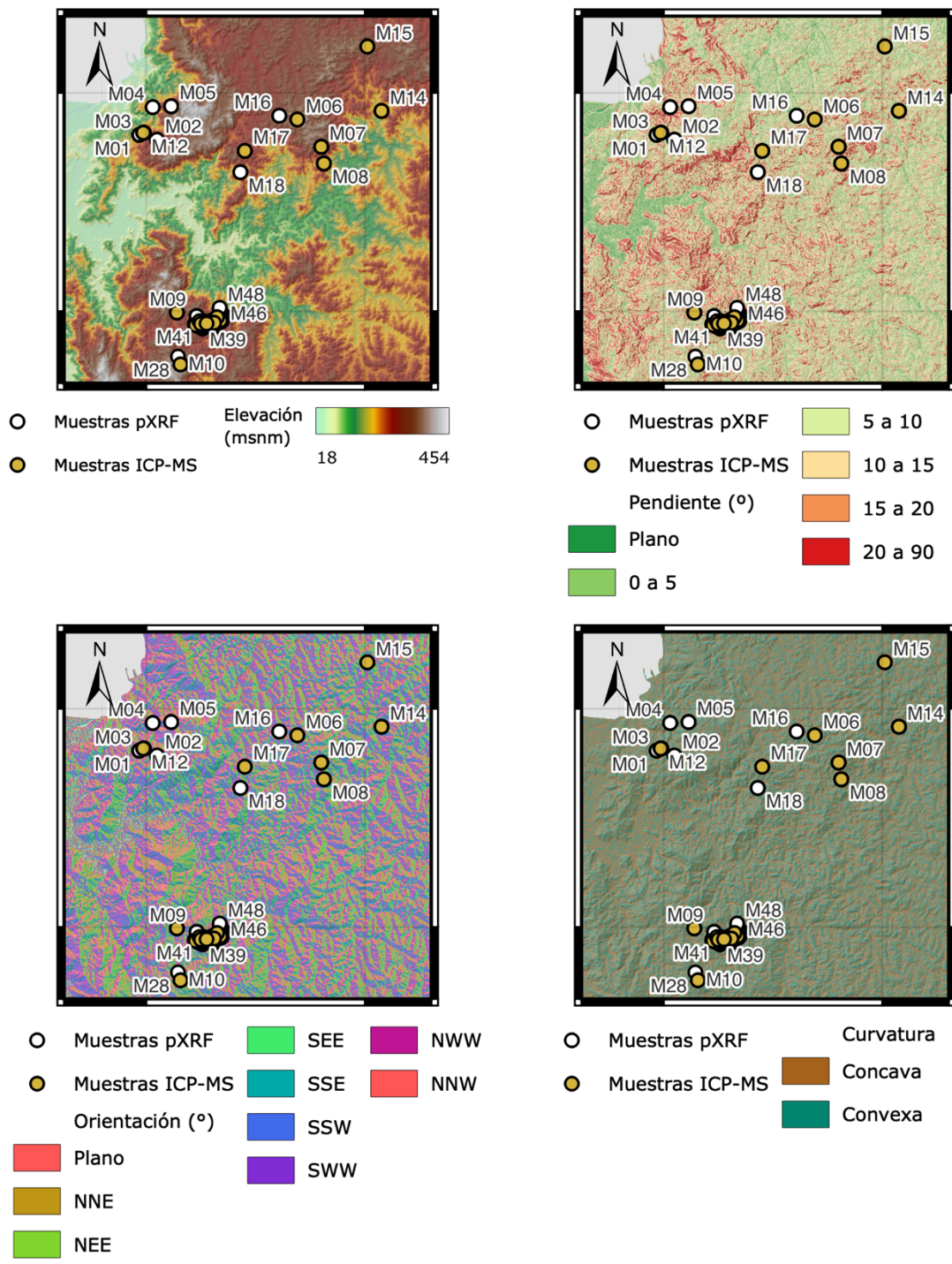


Figura 5.11: Ubicación de las muestras y las características elevación, pendiente, orientación y curvatura en cada punto muestreado. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

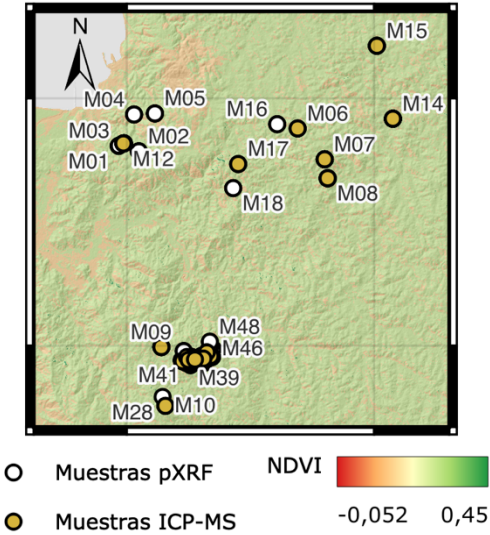


Figura 5.12: Ubicación de las muestras y NDVI cada punto muestreado. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

Para el cálculo de los pesos (WofE), se utilizó como ocurrencia aquellos sectores muestreados donde la suma total de Tierras Raras (REE) fuese mayor a 200 ppm. Este valor es seleccionado dado que para las funciones de probabilidad acumulada, tanto para análisis mediante pXRF como para ICP-MS, se producen quiebres en las cercanías de este valor en los gráficos. En este caso, se tienen 80 muestras para valores de pXRF (Tabla 5.3) y 24 muestras para ICP-MS. El área total son 59.790 Ha, ya que se ha quitado la influencia del mar.

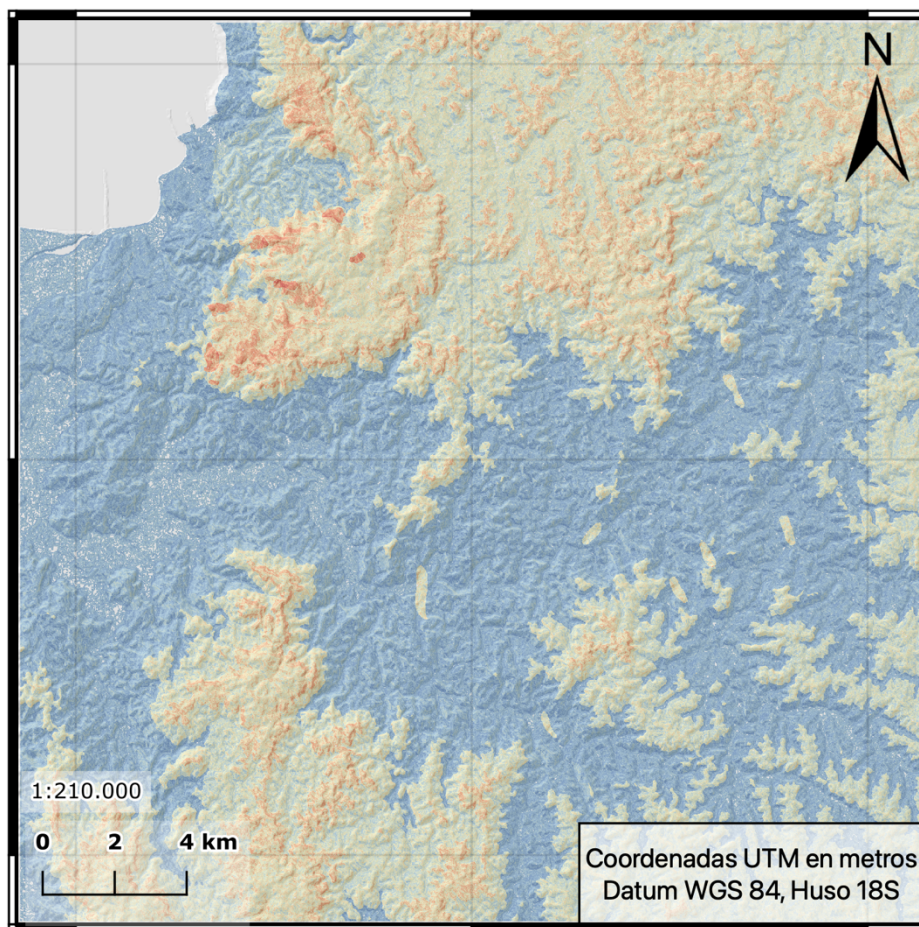
Para el caso de los mapas de contraste expuestos en las páginas siguientes, aquellas zonas de tonos azules son aquellas que tienen menores probabilidades de encontrar este tipo de depósitos enriquecidos en REE, mientras que aquellos de color rojo son aquellos que tienen las probabilidades más altas de tenerlo.

Tabla 5.3: Calculo de Contraste para el método de los pesos de la evidencia, utilizando datos medidos mediante el método de fluorescencia de rayos X y una ley de corte de 200 ppm.

	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Pendiente	Plano	0	0%	568	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	0 a 5	16	20%	9698	16%	1,23	0,95	0,21	-0,05	0,26
	5 a 10	20	25%	17876	30%	0,84	1,07	-0,18	0,07	-0,25
	10 a 15	13	16%	16163	27%	0,60	1,15	-0,51	0,14	-0,65
	15 a 20	20	25%	10371	17%	1,44	0,91	0,37	-0,10	0,46
	20 a 90	11	14%	5113	9%	1,61	0,94	0,47	-0,06	0,53
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Elevación	0 a 226	6	8%	29073	49%	0,15	1,80	-1,87	0,59	-2,46
	226 a 266	14	18%	10701	18%	0,98	1,00	-0,02	0,00	-0,03
	266 a 306	19	24%	10741	18%	1,32	0,93	0,28	-0,07	0,35
	306 a 346	32	40%	6339	11%	3,77	0,67	1,33	-0,40	1,73
	346 a 454	9	11%	2937	5%	2,29	0,93	0,83	-0,07	0,90
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Orientación	Plano	3	4%	547	1%	4,10	0,97	1,41	-0,03	1,44
	NNE	12	15%	7209	12%	1,24	0,97	0,22	-0,03	0,25
	NEE	8	10%	7252	12%	0,82	1,02	-0,19	0,02	-0,22
	SEE	12	15%	7044	12%	1,27	0,96	0,24	-0,04	0,28
	SSE	9	11%	6421	11%	1,05	0,99	0,05	-0,01	0,05
	SSW	5	6%	7433	12%	0,50	1,07	-0,69	0,07	-0,76
	SWW	16	20%	8276	14%	1,44	0,93	0,37	-0,07	0,44
	NWW	6	8%	8258	14%	0,54	1,07	-0,61	0,07	-0,68
	NNW	9	11%	7350	12%	0,92	1,01	-0,09	0,01	-0,10

	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Curvatura	Cóncavo	33	41%	32299	54%	0,76	1,28	-0,27	0,25	-0,51
	Convexo	47	59%	27492	46%	1,28	0,76	0,25	-0,27	0,51
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Geología	Diorita	8	10%	1818	3%	3,29	0,93	1,19	-0,07	1,26
	Formación Curanilahue	0	0%	844	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	Granitoide de Granate	8	10%	309	1%	19,32	0,90	2,96	-0,10	3,06
	Terrazas Fluviales	0	0%	104	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	Valles Actuales	0	0%	45	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	Formación Kiriquina	0	0%	332	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	Terrazas Marinas	0	0%	2677	4%	0,00	1,05	0,00	0,05	0,00
	Batolito de la Costa	64	80%	48608	81%	0,98	1,07	-0,02	0,07	-0,08
	Formación Santa Juana	0	0%	5052	8%	0,00	1,09	0,00	0,09	0,00
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
NDVI	-1 a -0.1	0	0%	27	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	-0.1 a 0.1	13	16%	10819	18%	0,90	1,02	-0,11	0,02	-0,13
	0.1 a 0.4	67	84%	48848	82%	1,03	0,89	0,02	-0,12	0,14
	0.4 a 1	0	0%	97	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00

A partir de la Tabla 5.3, se puede crear el mapa de contrastes para la fluorescencia portátil de rayos X, el cual se observa en la Figura 5.13.



LEYENDA Y SIMBOLOGÍA

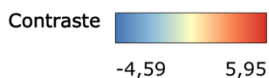


Figura 5.13: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones de pXRF y una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

En este caso, donde se tienen muestras analizadas mediante pXRF con concentración sobre los 200 ppm totales de REE, los valores que más afectan de forma negativa son principalmente las elevaciones bajas (clase 1 entre 0 y 226 msnm). Esto podría deberse a que estas zonas, como se puede ver en el mapa de la Figura 5.11, corresponde a zonas donde no se tomaron muestras, además de estar relacionadas a las planicies costeras o zonas fluviales como por ejemplo la ribera del río Biobío, es decir, zonas donde la geología presente no correspondería a un intrusivo meteorizado

(regolito), zona que según Bustos (2020), Cocker (2012), Li y Colaboradores (2017) sería la zona típica de concentración de REE en este tipo de depósitos, sino más bien a unidades cuaternarias de removilización de sedimentos, por lo cual no se esperaría encontrar concentraciones muy altas.

En el caso de las clases que más afectan de forma positiva el mapa de contrastes, es decir, aquellas zonas que tienen más probabilidad de encontrar anomalías de REE sobre 200 ppm, están las áreas donde las litologías presentes corresponderían a dioritas y granitoides de granate. Esto es coherente con el tipo de mineralización declarado por Aclara (2021), donde sus zonas de potencial extracción presentan este tipo de litología. Esto se debe a la meteorización de minerales como la monacita, el granate almandino y la allanita. Otra de las clases que más afectarían la mineralización en este caso sería las zonas "planas" o sin una orientación bien definida, en este caso podría deberse a que se tienen 3 ocurrencias en dentro de un área muy pequeña de la clase. Por último, las áreas entre los 306 y 346 msnm, junto con las áreas más altas, tienen valores de contraste más elevados, lo cual tendría relación con que corresponden a las partes donde aflora el batolito de la costa dentro de la cordillera de Nahuelbuta, además de al ser las zonas más altas, fueron las que llevan más tiempo expuestas a las condiciones de meteorización.

Ahora, para los resultados obtenidos mediante ICP-MS se hace el mismo análisis teniéndose los resultados en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Calculo de Contraste para el método de los pesos de la evidencia, utilizando datos medidos mediante el método de ICP-MS y una ley de corte de 200 ppm.

	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Pendiente	Plano	0	0%	568	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	0 a 5	0	0%	9698	16%	0,00	1,19	0,00	0,18	0,00
	5 a 10	8	33%	17876	30%	1,11	0,95	0,11	-0,05	0,16
	10 a 15	1	4%	16163	27%	0,15	1,31	-1,87	0,27	-2,14
	15 a 20	8	33%	10371	17%	1,92	0,81	0,65	-0,21	0,87
	20 a 25	7	29%	5113	9%	3,41	0,77	1,23	-0,26	1,48
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Elevación	0 a 226	5	21%	29073	49%	0,43	1,54	-0,85	0,43	-1,28
	226 a 266	1	4%	10701	18%	0,23	1,17	-1,46	0,15	-1,61
	266 a 306	7	29%	10741	18%	1,62	0,86	0,48	-0,15	0,63
	306 a 346	10	42%	6339	11%	3,93	0,65	1,37	-0,43	1,80
	346 a 454	1	4%	2937	5%	0,85	1,01	-0,16	0,01	-0,17
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Orientación	Plano	1	4%	547	1%	4,55	0,97	1,52	-0,03	1,55
	NNE	0	0%	7209	12%	0,00	1,14	0,00	0,13	0,00
	NEE	0	0%	7252	12%	0,00	1,14	0,00	0,13	0,00
	SEE	2	8%	7044	12%	0,71	1,04	-0,35	0,04	-0,38
	SSE	5	21%	6421	11%	1,94	0,89	0,66	-0,12	0,78
	SSW	1	4%	7433	12%	0,34	1,09	-1,09	0,09	-1,18
	SWW	7	29%	8276	14%	2,11	0,82	0,75	-0,20	0,94
	NWW	1	4%	8258	14%	0,30	1,11	-1,20	0,11	-1,30
	NNW	7	29%	7350	12%	2,37	0,81	0,86	-0,21	1,08

	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Curvatura	Cóncavo	13	54%	32299	54%	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01
	Convexo	11	46%	27492	46%	1,00	1,00	0,00	0,00	-0,01
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Geología	Diorita	0	0%	1818	3%	0,00	1,03	0,00	0,03	0,00
	Formación Curanilahue	0	0%	844	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	Granitoide de Granate	7	29%	309	1%	56,35	0,71	4,03	-0,34	4,37
	Terrazas Fluviales	0	0%	104	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	Valles Actuales	0	0%	45	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	Formación Kiriquina	0	0%	332	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	Terrazas Marinas	0	0%	2677	4%	0,00	1,05	0,00	0,05	0,00
	Batolito de la Costa	17	71%	48608	81%	0,87	1,56	-0,14	0,44	-0,58
	Formación Santa Juana	0	0%	5052	8%	0,00	1,09	0,00	0,09	0,00
	Clase	Muestras sobre 200 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
NDVI	-1 a -0.1	0	0%	27	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	-0.1 a 0.1	4	17%	10819	18%	0,92	1,02	-0,08	0,02	-0,10
	0.1 a 0.4	20	83%	48848	82%	1,02	0,91	0,02	-0,09	0,11
	0.4 a 1	0	0%	97	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00

A partir de la anterior, se puede crear el mapa de contrastes para la fluorescencia portátil de rayos X, el cual se observa en la Figura 5.14.

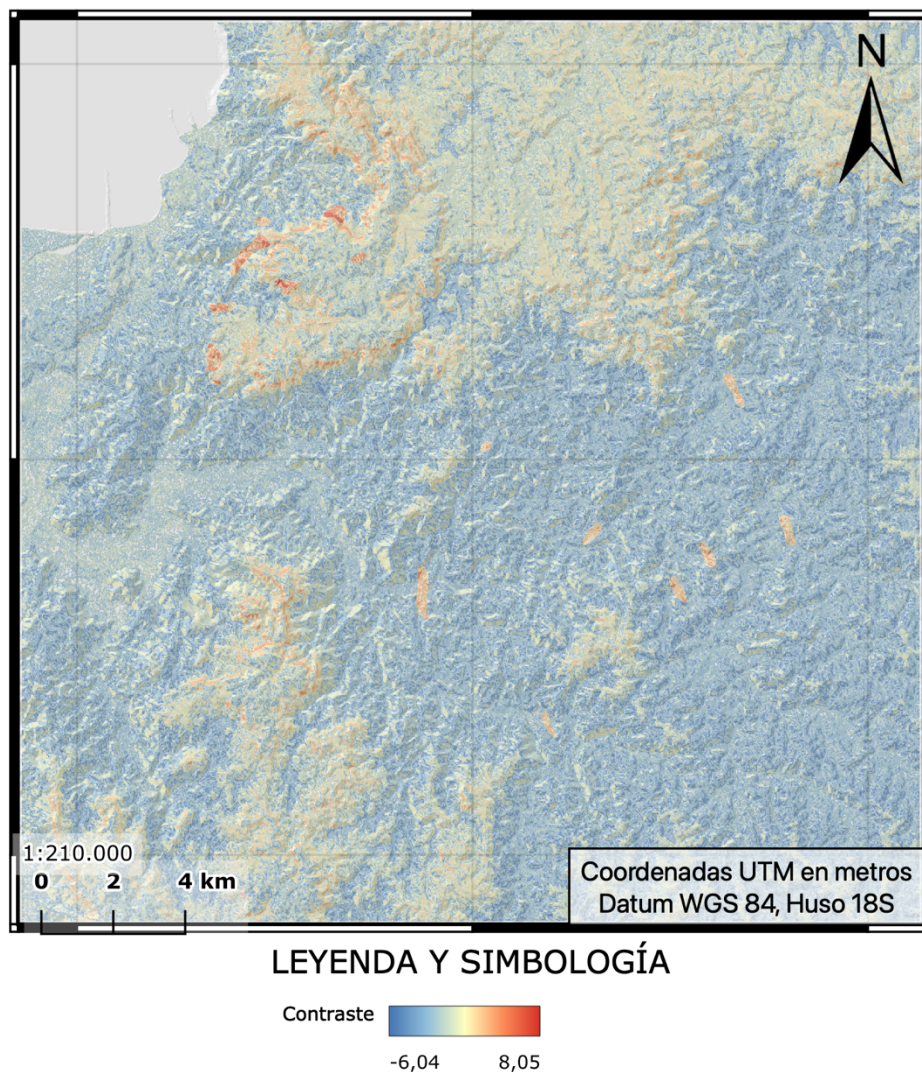
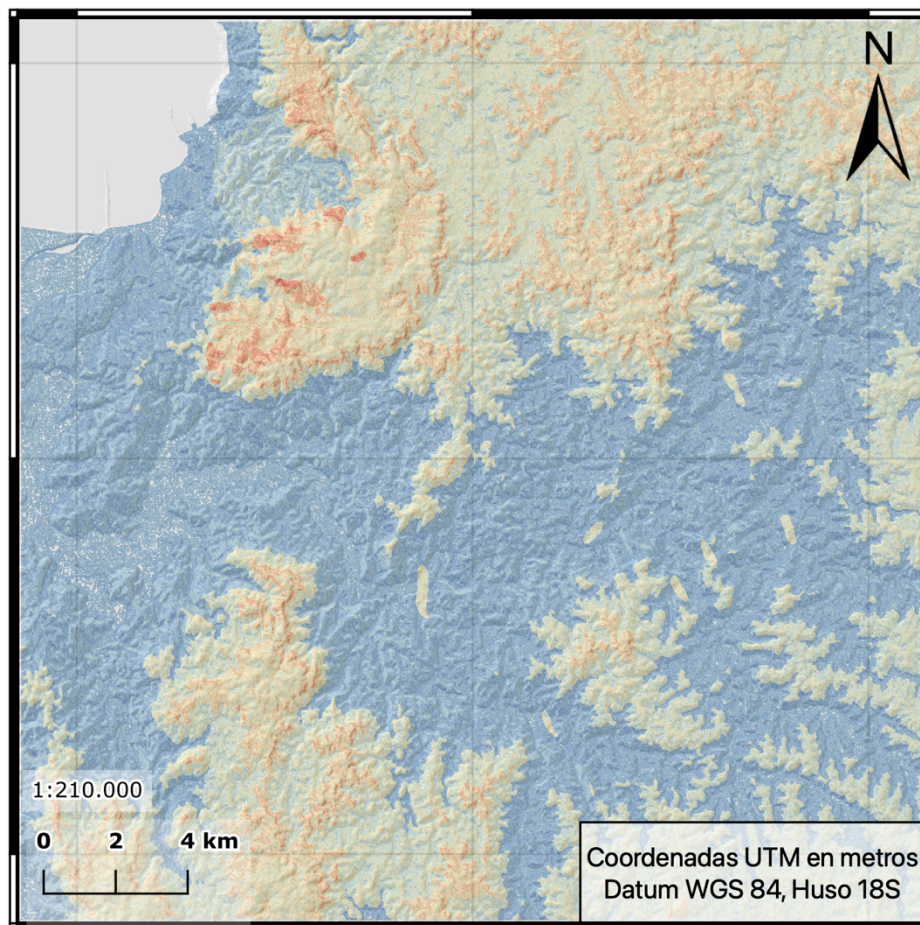


Figura 5.14: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones de ICP-MS y una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

Si comparamos el mapa realizado al utilizar los resultados medidos con pXRF con el mapa realizado con los resultados obtenidos mediante ICP-MS, se observar que existe correlación entre ellos. En primer lugar, nuevamente aquellas zonas bajas son aquellas que tienen la menor probabilidad de encontrar este tipo de mineralización, siendo las categorías entre los 0 y 266 metros sobre el nivel del mar las que afectan de forma más negativa una potencial mineralización. Por otra parte, aquellas zonas que son más probables de haber pasado por procesos de

enriquecimiento de REE y por tanto, de presentar este tipo de depósitos de tierras raras iónicas hospedadas en regolitos, son los sectores altos, con pendientes mayores a 15°, y por sobre todo, zonas asociadas a granitoides de granate. Ahora, según lo observado en la Tabla 5.4, características como la orientación, la curvatura o el NDVI parecen no tener efectos significantes en la concentración de tierras raras.

Con los mapas generados mediante ambos métodos de medición, es posible generar un mapa que combine ambos métodos, dada la buena correlación entre variables que afectan el análisis mediante los pesos de la evidencia, además de la buena correlación de elementos como el Itrio. Este mapa combinado se aprecia en la Figura 5.15.



LEYENDA Y SIMBOLOGÍA

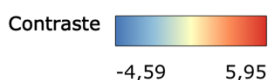
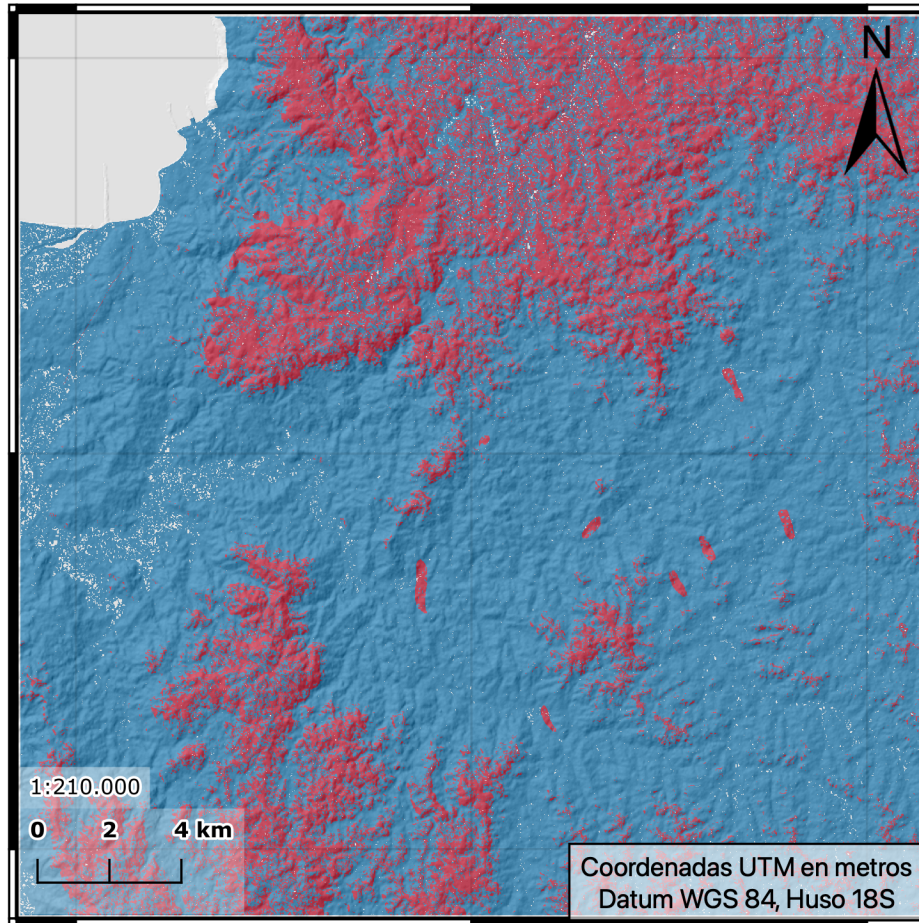


Figura 5.15: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones ICP-MS y pXRF, considerando una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

Es por esta relación entre valores que pesan mucho (como las zonas altas y las litologías), que el mapa generado al combinar ambos métodos de análisis muestra que las zonas más posibles de encontrar concentraciones totales de REE mayores a 200 ppm serían zonas altas, con litologías predominantes como lo son el granitoide de granate y la diorita, mientras que aquellas zonas bajas, con litologías distintas a las mencionadas anteriormente tienden a mostrar valores negativos. En este sentido, clases como el índice normalizado de vegetación (NDVI) del lugar donde se tomó la muestra no tiene mucho peso en el valor final, mientras que clases como la orientación, curvatura o la pendiente no se comportan de igual manera en ambos métodos de análisis utilizado. El combinar ambos métodos resulta conveniente debido a que sirve para filtrar la información entregada por ambos, al acentuar aquellas zonas que tienen en común.

Otra forma que sirve como filtro es generar un mapa que convierta los resultados en un sistema binario, como el observado en la Figura 5.16. Para ello se puede normalizar el mapa generado a valores $[0, 1]$, siendo aquellos valores negativos iguales a cero (menos favorables de encontrar enriquecimiento de REE) y los valores positivos pasan a ser igual a 1 (casos más favorables).



LEYENDA Y SIMBOLOGÍA

Valores de contraste		Negativos
		Positivos

Figura 5.16: Mapa de contrastes normalizados a valores negativos y positivos para una ley de corte de 200 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

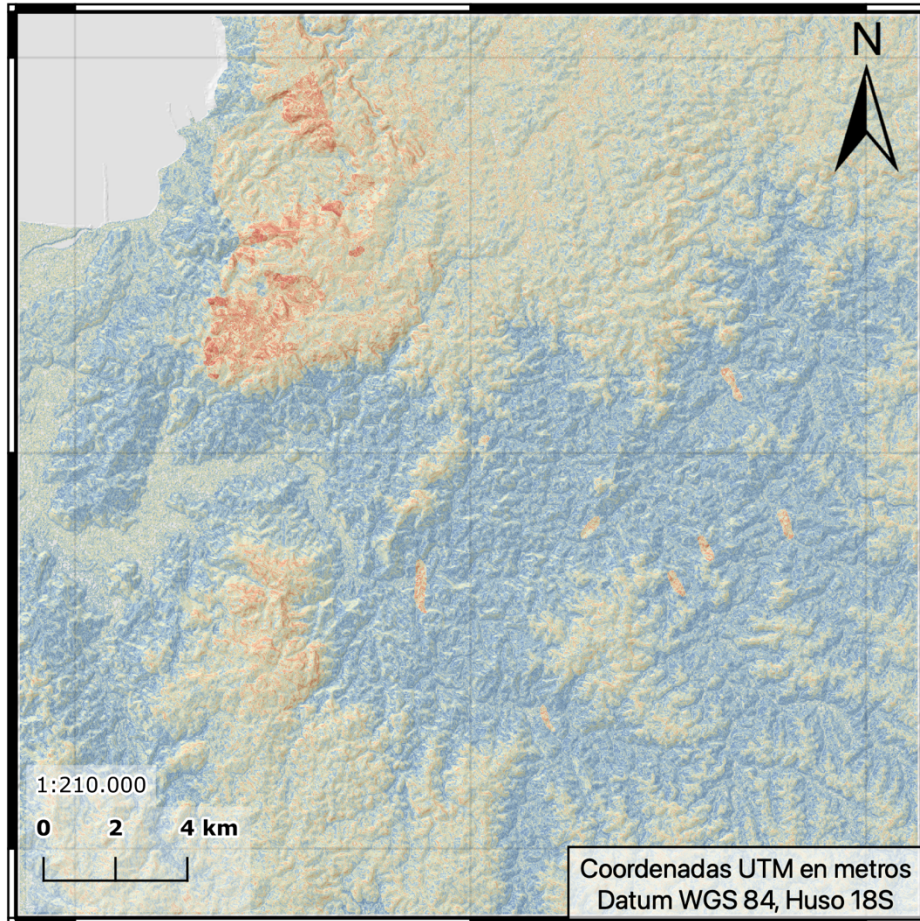
Este mapa normalizado le asigna una probabilidad de ocurrencia a todo sector donde el contraste sea mayor a 0. Con esto, cada zona de color rojo en el mapa podría ser un potencial flanco de exploración a futuro.

A modo de ejercicio, para comparar que ocurriría al aumentar la ley de corte a analizar, se realiza el mismo calculo para aquellas muestras con concentraciones mayores a 400 ppm, obteniéndose lo observado en la Figura 5.17 y en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Calculo de Contraste para el método de los pesos de la evidencia, utilizando datos medidos mediante el método de fluorescencia de rayos X y una ley de corte de 400 ppm.

	Clase	Muestras sobre 400 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Pendiente	Plano	0	0%	568	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	0 a 5	12	32%	9698	16%	1,95	0,82	0,67	-0,20	0,87
	5 a 10	6	16%	17876	30%	0,53	1,20	-0,64	0,18	-0,82
	10 a 15	3	8%	16163	27%	0,29	1,26	-1,23	0,23	-1,46
	15 a 20	8	21%	10371	17%	1,21	0,96	0,19	-0,05	0,24
	20 a 90	9	24%	5113	9%	2,77	0,83	1,02	-0,18	1,20
	Clase	Muestras sobre 400 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Elevación	0 a 226	5	13%	29073	49%	0,27	1,69	-1,31	0,52	-1,83
	226 a 266	7	18%	10701	18%	1,03	0,99	0,03	-0,01	0,04
	266 a 306	17	45%	10741	18%	2,49	0,67	0,91	-0,40	1,31
	306 a 346	7	18%	6339	11%	1,74	0,91	0,55	-0,09	0,64
	346 a 454	2	5%	2937	5%	1,07	1,00	0,07	0,00	0,07
	Clase	Muestras sobre 400 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Orientación	Plano	0	0%	547	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	NNE	6	16%	7209	12%	1,31	0,96	0,27	-0,04	0,31
	NEE	4	11%	7252	12%	0,87	1,02	-0,14	0,02	-0,16
	SEE	2	5%	7044	12%	0,45	1,07	-0,81	0,07	-0,88
	SSE	4	11%	6421	11%	0,98	1,00	-0,02	0,00	-0,02
	SSW	3	8%	7433	12%	0,64	1,05	-0,45	0,05	-0,50
	SWW	10	26%	8276	14%	1,90	0,86	0,64	-0,16	0,80
	NWW	1	3%	8258	14%	0,19	1,13	-1,66	0,12	-1,78
	NNW	8	21%	7350	12%	1,71	0,90	0,54	-0,11	0,64

	Clase	Muestras sobre 400 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Curvatura	Cóncavo	13	34%	32299	54%	0,63	1,43	-0,46	0,36	-0,82
	Convexo	25	66%	27492	46%	1,43	0,63	0,36	-0,46	0,82
	Clase	Muestras sobre 400 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
Geología	Diorita	8	21%	1818	3%	6,92	0,81	1,93	-0,21	2,14
	Formación Curanilahue	0	0%	844	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	Granitoide de Granate	8	21%	309	1%	40,67	0,79	3,71	-0,23	3,94
	Terrazas Fluviales	0	0%	104	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	Valles Actuales	0	0%	45	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	Formación Kiriquina	0	0%	332	1%	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00
	Terrazas Marinas	0	0%	2677	4%	0,00	1,05	0,00	0,05	0,00
	Batolito de la Costa	22	58%	48608	81%	0,71	2,25	-0,34	0,81	-1,15
	Formación Santa Juana	0	0%	5052	8%	0,00	1,09	0,00	0,09	0,00
	Clase	Muestras sobre 400 (ppm)	% Ocurrencia	Área (Ha)	% Área	ratio W+	ratio W-	W+	W-	C
NDVI	-1 a -0.1	0	0%	27	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
	-0.1 a 0.1	6	16%	10819	18%	0,87	1,03	-0,14	0,03	-0,16
	0.1 a 0.4	32	84%	48848	82%	1,03	0,86	0,03	-0,15	0,18
	0.4 a 1	0	0%	97	0%	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00



LEYENDA Y SIMBOLOGÍA

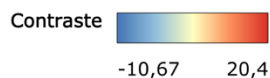


Figura 5.17: Mapa de Contrastes generado a partir de mediciones de pXRF y una ley de corte de 400 ppm. Coordenadas fueron omitidas por confidencialidad.

Se puede notar a partir de las zonas de color rojo en los mapas expuestos en las Figura 5.13 y Figura 5.17, que una mayor ley de corte reduce las áreas de interés que podrían estar potencialmente mineralizadas. En ese sentido, lo que más afecta de forma positiva son las zonas altas, con pendientes mayores a 15° y con litologías granitoide. Aquellas características que afectan de forma negativa son su contraparte: zonas bajas y de baja pendiente, con litologías no graníticas.

Por último, aquellos factores que más afectan de forma negativa o positiva, son la elevación, la pendiente y la litología, mientras la orientación, curvatura y NDVI parecen ser factores secundarios, que no se comportan de manera continua en cada caso y por tanto no serían correlacionables a una potencial concentración de estos elementos.

6 CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo consistió en aplicar métodos de exploración a zonas con una potencial concentración de tierras raras asociadas a arcillas iónicas en regolito con el fin de determinar áreas de interés para la realización de futuras prospecciones. Para esto, se realizó una etapa de recopilación bibliográfica, donde a partir de esto se logró diseñar y aplicar una metodología de exploración.

En este sentido, el diseño de la metodología de exploración tenía que estar acorde al tipo de depósito al cual se estaba apuntando. Dado que las tierras raras hospedadas en regolito corresponden a un tipo de mineralización en traza y por tanto no son reconocibles a simple vista, se propone el uso de la fluorescencia portátil de rayos X como un ensayo de pre - laboratorio. Al comparar los valores obtenidos mediante este método con los valores de ICP, no se observa una correlación directa con todos los elementos, obteniéndose valores bastante alejados en elementos como el Neodimio y Praseodimio. A pesar de lo anterior, elementos como el Itrio logran tener una buena correlación pXRF vs ICP, siendo casi iguales a lo largo de este estudio. Dado esta excelente correlación, se propone utilizar el Itrio como rastreador de este tipo de elementos, sobre todo para tierras raras pesadas.

Con respecto al grado de enriquecimiento de las muestras, dado el gráfico de valores normalizados a condrito, el Europio es el único elemento que tiene un comportamiento continuo a lo largo de todas las muestras, encontrándose empobrecido con respecto a la corteza. En general, para los otros elementos de REE, las muestras no siguen un comportamiento marcado, por lo que se encuentran muestras enriquecidas y empobrecidas con respecto a la corteza. Sin embargo, en la mayoría de los elementos estudiados a partir de las muestras obtenidas, el promedio parece tener concentraciones más bajas que la corteza. A pesar de lo anterior, hacer una comparación solo con respecto a la corteza es un análisis demasiado general, por lo que se propone realizar análisis de concentraciones de tierras raras totales a los protolitos de los regolitos estudiados, con el fin de confirmar si se tiene un enriquecimiento dado un proceso de meteorización.

Si se observan los grados de fraccionamiento de las muestras, se tiene que al comparar los resultados por cada muestra los comportamientos tienden a variar. En este sentido, se tienen zonas enriquecidas en Ce que podrían estar ubicadas en la parte superior del regolito y que en profundidad podrían aumentar su grado de enriquecimiento en otras REE, como también hay zonas empobrecidas en Ce que indicarían lo contrario.

Si bien el comportamiento del Cerio tiende a ser distinto dependiendo de la muestra, los otros grados de fraccionamiento tienden a comportarse de igual forma en todos los sectores muestreados. En este sentido, las tierras raras livianas predominan en comparación a las intermedias y pesadas en todas las zonas, siendo este último grupo el menos enriquecido comparativamente.

Los mapas predictivos realizados utilizando el método de los "pesos de la evidencia" muestran ciertas zonas con un alto potencial de zonas enriquecidas con REE, donde las características que más pesan en el cálculo son:

1. La litología, siempre asociada a rocas intrusivas graníticas donde la literatura señala que se desarrollan los depósitos de tierras raras hospedadas en regolitos
2. Las zonas altas, asociado a que son las zonas que primero fueron expuestas después del rápido alzamiento ocurrido desde el Pleistoceno, donde los climas del periodo concuerdan con los climas tropicales que producen perfiles de meteorización gruesos.
3. Las pendientes altas, lo cual estaría asociado a que las zonas donde se tomaron muestras correspondían a taludes que permitieron estudiar los distintos grados de enriquecimiento en profundidad.

Por último, se recomienda para futuras campañas de exploración la realización de grillas de muestreo, con el fin de obtener datos aleatorios y no concentrados en un lugar específico, dado que esta situación pudo afectar los resultados finales y el uso de la pXRF como indicador de zonas de potencial mineralización de REE, sobre todo pesadas, dada la excelente correlación que existe entre este elemento y ellas.

7 BIBLIOGRAFÍA

Aclara. (2021). Amended and Restated NI 43-101 Technical Report Preliminary Economic Assessment for Penco Module Project Penco, Biobio Region, Chile. Vancouver: Informe inédito elaborado por Ausenco para Aclara. 420 páginas.

Aguirre, L., Francisco, H., & Godoy, E. (1986). Distribution of metamorphic facies in Chile. An outline. 1972: Kristalinikum No 9. Páginas 7 a 9.

Alarcon, A. (2019). Caracterización óptica y composicional del concentrado de minerales de Uranio, Torio y Tierras Raras en las pegmatitas de Poñen y Parque Coyanmahuida. Concepción, Chile: Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción.

Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geoscience Frontiers.

Biró, L. (1982). Revisión y redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano - Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la Isla Quiriquina a 36°27' Lat.Sur, Chile, Sudamérica, con su perfil complementario en Cocholgüe. Concepción: III Congreso Geológico Chileno.

Bustos, N. (2020). Exploración de tierras raras hospedadas en regolito en la cordillera de la costa de los andes centrales. Santiago, Chile: Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. 164 páginas.

Cartes, N. (2004). Petrografía y Ambiente de Depositación de las Metapelitas Paleozoicas con Huellas Fósiles, entre Tomé y Lirquén, VII Región del Bio-bío, Chile. Concepción, Chile: Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. 115 páginas.

Chakhmouradian, A., & Zaitsev, A. (2012). Rare Earth Mineralization in Igneous Rocks: Sources and Processes.

Cocker, M. (2012). Lateritic, supergene rare earth element (REE) deposits. Arizona: Arizona Geological Survey, Special Paper 9, Chapter No 4.

Cucurella, J. (1978). Estudio geológico y radiométrico del valle del río Bío-Bío, Provincia de Concepción, VIII Región. Santiago: Memoria de Título. Universidad de Chile, Departamento de Geología. 86 páginas.

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.

Dirección General de Aguas. (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Biobío. Informe preparado por CADE-IDEPE. 185 páginas.

Dirección General de Aguas. (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Andalien.

Fernandez, V. (2017). Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. Santiago, Chile: Resources Policy 53. Páginas 26 a 45.

Ferraris, F. (1981). Hoja de Los Angeles-Angol, Región del Bío-Bío. Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geológicos Preliminares, 5, 26, escala 1:250.000.

Fisher, L., Gazley, M., Baensch, A., Barnes, S., Cleverley, J., & Duclaux, G. (2014). Resolution of geochemical and lithostratigraphic complexity: a workflow for application of portable X-ray fluorescence to mineral exploration. 12 páginas.

Freedman, M.-F. (2018). Estudio del potencial Geológico y Económico para desarrollo productivo de pequeña minería del prospecto Poñen, Región del Biobío. Concepción, Chile: Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción.

Gajardo, A. (1980). Geología de la Hoja Concepción-Chillán. Instituto de Investigación Geológica, Mapas Geológicos preliminares Chile No 4.

Gonzales-Bonorino, F., & Aguirre, L. (1970). Metamorphic facies series of the crystalline basement of Chile. Geol. Rundsch Vol. 59 No 3. Páginas 979 a 994.

Gonzalez-Bonorino, F. (1970). Series Metamórficas del Basamento Cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile Central. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Publicaciones, 37. 68 páginas.

Goodenough, K., Wall, F., & Merriman, D. (2017). The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. Natural Resources Research, Vol. 27, No 2. 16 páginas.

Grauch, R. (1989). Rare Earth Elements in Metamorphic Rocks. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, Chapter 6. .

Hall, G., Bonham-Carter, G., & Buchar, A. (2014). Evaluation of portable X-ray fluorescence (pXRF) in exploration and mining: Phase 1, control reference materials. *Ontario, Canadá: Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 14, 2014, pp. 99–123.

Herve, F. (1977). Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. Tokyo: *En Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific orogenic belt in Japan and Chile*. Japan society for promotion of Sciences. Páginas 1 a 51.

Herve, F. (1988). Late Palaeozoic Subduction and Accretion in Southern Chile. *Episodes*. Vol. 11 No 3.

Le Roux, J. (2011). A review of Tertiary climate changes in southern South America and the Antarctic Peninsula. Part 2: continental conditions. *Sedimentary Geology*, 21-38.

Lee, S., Choi, J., & Min, K. (2002). Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model.

Li, M., & Zhou, M.-F. (2020). The role of clay minerals in formation of the regolith-hosted heavy rare earth element deposits . *American Mineralogist*, Vol 105. Páginas 92 a 108.

Li, M., Zhou, M., & Zhao, W. (2017). Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model. *Journal of Asian Earth Sciences* 148. Páginas 65 a 95.

López, A. (2017). *Caracterización Geoquímica , Litológica Y Espacial De las tierras raras del yacimiento El Teniente*. . Santiago, Chile: Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas de la Universidad de Chile. 132 Páginas.

McDonough, W., & Sun, S. (1995). *The Composition of the Earth*. Canberra, Australia: Chemical Geology.

Molina, P. (2017). *Estudio Geológico-Estructural en el área carbonífera de Coronel, VIII Región del Biobío, Chile*. Concepción, Chile: Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. 98 páginas.

Munizaga, F., Aguirre, L., & Herve, F. (1973). Rb-Sr ages of rocks from the Chilean metamorphic basement. *Earth Planet. Sci. Lett.* Vol 18 No 1. Páginas 87 a 91.

Muñoz-Cristi, J. (1968). Contribución al conocimiento geológico de la región situada al sur de Arauco y participación del material volcánico en los sedimentos eocenos. Santiago: El Terciario de Chile, Zona Central, Sociedad Geológica de Chile. 385 páginas.

Olympus. (2020). Portable XRF for Rare-Earth Element Identification and Exploration.

Parsons, C., Grabulosa, E., Pili, E., Floor, G., Roman-Ross, G., & Charlet, L. (2012). Quantification of trace arsenic in soils by field-portable X-ray fluorescence spectrometry: Considerations for sample preparation and measurement conditions. *Journal of Hazardous Materials*.

Pineda, V. (1983). Evolución Paleogeográfica de la Cuenca Sedimentaria Cretácico-Terciaria de Arauco. Concepción: Geología y recursos minerales de Chile, editado por J. Frutos, R. Oyarzún y M. Pincheira, editorial de la Universidad de Concepción.

Rehak, K. (2008). Pliocene-Pleistocene landscape evolution in south-central Chile. Institut für Geowissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Potsdam.

Salazar, C. (2004). Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina. VIII Región del Bío-Bío. Chile sistemática, Bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Concepción: Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción.

Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016). Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits. *Reviews in Economic Geology* 18. Páginas 55 a 79.

Thermo Scientific. (2012). Exploration and Mining of Rare Earth Elements (REE) Using Tube-Based Thermo Scientific Portable XRF Analyzers.

U.S. Geological Survey. (2011). Rare Earth Elements—End Use and Recyclability. Scientific Investigations Report 2011–5094. 22 páginas.

U.S. Geological Survey. (2017). Rare-Earth Elements Chapter. <https://doi.org/10.3133/pp18020>.

U.S. Geological Survey. (2022). Mineral Commodity Summaries.

Universidad de Burgos. (11 de Marzo de 2022). Universidad de Burgos. Retrieved Diciembre de 2022, from Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS): <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios->

cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms

Villela, D., Donoso, F., & Cantalops, J. (2016). Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile. Santiago: Cochilco. 55 páginas.

Werner, D., Gomila, R., & Arancibia, G. (2013). Ocurrencia de elementos químicos de Tierras Raras en yacimientos tipo Óxido de Hierro-Cobre-Oro andinos. Journal I3, 3. páginas 32 a 37.

Wu, C., Huang, D., & Guo, Z. (1990). REE geochemistry in the weathered crust of granites, Longnan area, Jiangxi Province. Acta Geologica Sinica (English Editioon). Páginas 193 a 209.

Ya'acob, N., Mohd Azize, A., Mahmon, N., Yusof, A., Azmi, N., & Mustafa, N. (2014). Temporal Forest Change Detection and Forest Health Assessment using Remote Sensing. Malaysia: International Conferences on Geological, Geographical, Aerospace and Earth Sciences.