



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



**CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA
DEL TRANQUE DE RELAVES N°2, PLANTA LA COCINERA,
OVALLE, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**



Memoria para optar al Título de Geólogo

Felipe Ignacio González Arias

Profesor Patrocinante: Dra. Ursula Elisabeth Dorothea Kelm
Profesores Comisión: Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo
MSc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2022

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Ubicación y Accesos	3
1.3. Clima	4
1.4. Contexto Histórico	5
1.5. Metodología	6
1.5.1. Etapa de planificación	6
1.5.2. Etapa de terreno	7
1.5.3. Etapa de laboratorio	8
1.5.4. Etapa de gabinete	8
1.6. Trabajos Anteriores	8
1.7. Agradecimientos	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Conceptos básicos	11
2.2. Método del Hiper cubo Latino	15
3. MARCO GEOLÓGICO Y MINERO	17
3.1. Geología regional y local	17
3.2. Distritos Mineros	19
3.3. Minería no metálica	22
4. CARACTERIZACIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES	24
4.1. pH y humedad	25
4.2. Descripción Macroscópica	26
4.3. Análisis Granulométrico por Difracción Láser	27
4.4. Análisis por Difracción de Rayos X	31
4.4.1. Análisis en muestra total	32
4.4.2. Análisis en fracción argílica (0,45 - 2 μm)	35
4.5. Análisis por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X	38
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
5.1. Historia	43
5.2. Mineralogía	46
5.3. Recuperación	53

5.4. Evaluación del riesgo para la salud humana	55
5.5. Estado de los depósitos de relaves en Chile y normativa legal	60
6. CONCLUSIONES	62
7. REFERENCIAS	64
ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Vista satelital de la Planta La Cocinera	1
1. 2. Ubicación del área de estudio	3
1. 3. Climograma de la ciudad de Ovalle	4
1. 4. Vista satelital de sondajes del tranque N°2	7
2. 1. Difracción láser	12
2. 2. Fluorescencia de rayos X	13
2. 3. Difracción de rayos X	14
4. 1. Histograma de distribución muestra Pz 13: 1,0-2,0	29
4. 2. Triángulo de clasificación de suelos	31
4. 3. Difractograma de la muestra Pz 35: 8,0-9,0	33
4. 4. Difractogramas de las muestras Pz 15: 9,0-10,0 y Pz 14: 9,0-10,0	34
4. 5. Difractograma para fracción argílica en muestra Pz 14: 9,0-10,0	36
4. 6. Difractograma para fracción argílica en muestra Pz 31: 17,0-17,6	38
5. 1. Elementos mayores normalizados al 100%	50
5. 2. Diagrama de Pareto con distribución de elementos menores	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4. 1. Muestras seleccionadas	24
4. 2. Mediciones de humedad y pH	25
4. 3. Descripción macroscópica	26
4. 4. Caracterización granulométrica por difracción láser	28
4. 5. Fases minerales en muestra total mediante DRX	32
4. 6. Concentraciones de elementos mayores	40
4. 7. Concentraciones de elementos menores y trazas	41
5. 1. Elementos contaminantes prioritarios	55
5. 2. Dosis suministradas por exposición vía ingestión accidental o contacto dérmico	58

RESUMEN

El tranque de relaves N°2 de la Planta La Cocinera, corresponde a un depósito de relaves ubicado en la ciudad de Ovalle, Chile. La planta es propiedad de ENAMI y aloja otros dos tranques de relaves en el lugar. La memoria de título se enmarca en el Proyecto ENAMI-Ovalle, cuyos estudios fueron solicitados al Instituto GEA de la Universidad de Concepción, con el objetivo de caracterizar los tranques de relaves de la planta mediante la realización de una campaña de 52 pozos de sondajes. y posteriormente, diversos análisis químicos en laboratorio.

En el trabajo se caracterizaron física, química y mineralógicamente nueve muestras representativas del tranque de relaves N°2, proceso realizado mediante diversos análisis químicos efectuados en las muestras. Los análisis fueron: análisis granulométrico por difracción láser, análisis por difracción de rayos X y análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Además de lo anterior, se realizó una medición de pH y humedad, junto a una descripción macroscópica.

El análisis granulométrico permitió determinar el tamaño de grano del tranque, siendo de tamaño fino, representado principalmente por limo, con partes menores de arena y arcilla. La difracción de rayos X permitió confeccionar difractogramas para la identificación de las fases minerales, donde destaca el cuarzo, plagioclasa, feldespatos, calcita, entre otros. La fracción argílica está compuesta por illita, caolinita, esmectita y corrensita. El análisis de fluorescencia de rayos X permitió distinguir los elementos mayores, menores y trazas. Los elementos mayores están representados por los siguientes óxidos: SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Na_2O y K_2O . Mientras que los elementos menores más importantes son el Cu, P, Mn, Ti y Zn.

La caracterización mineralógica del tranque guarda una estrecha relación con el yacimiento de Panulcillo, que se encuentra cercano a la Planta La Cocinera, procesando el material proveniente de la mina en el periodo que estuvo operativa, por lo que el tranque de relave posee mayoritariamente una ganga de skarn.

El tranque N°2 posee características que lo harían apto para la recuperación de minerales con valor económico, como el cobre, hierro, zinc, manganeso y fósforo. Lo anterior debido a que presenta un tamaño de grano fino, caracterizado por diversos parámetros texturales y metalúrgicos, como el D80 y -325#, importantes en el procesamiento de minerales, molienda y flotabilidad. Pese a lo anterior, se sugiere un estudio detallado de las implicancias metalúrgicas y ambientales para dicha recuperación.

1. INTRODUCCIÓN

La Planta La Cocinera, ubicada en la ciudad de Ovalle, cuenta con 3 tranques de relaves, cuyos primeros estudios fueron solicitados por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) al Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) y al Departamento de Ingeniería Metalúrgica, de la Universidad de Concepción, en el Proyecto ENAMI-Ovalle, con la finalidad de caracterizar física, química y mineralógicamente los tres depósitos de relaves presentes en el lugar. La redacción de la presente memoria de título es posterior al Proyecto ENAMI-Ovalle, y se centra en la caracterización de nueve muestras representativas del tranque de relaves N°2 de la Planta La Cocinera (Figura 1.1). Debido a la antigüedad de la planta y a las diferencias en el contexto de formación de cada tranque, se destaca la importancia de contar con dicha información, con miras a un proceso de cierre de planta y la posible recuperación de elementos, de interés económico, mediante reprocesamiento de minerales.

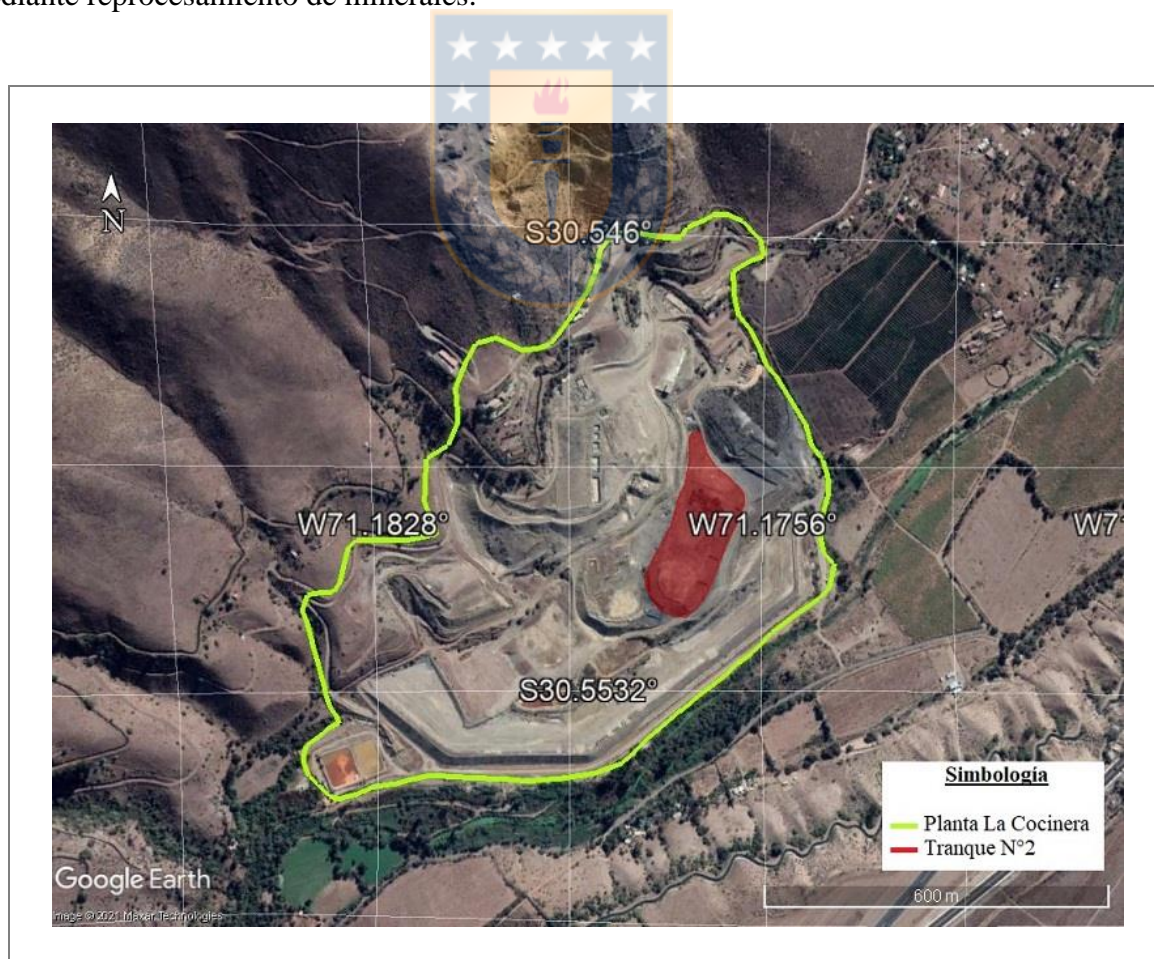


Figura 1.1: Vista satelital de la Planta La Cocinera. Se observa el perímetro de la planta y en rojo el área que corresponde al tranque de relaves N°2. Modificado de Google Earth.

La Cocinera, también llamada Planta Ovalle (anteriormente Planta Panulcillo) es propiedad de ENAMI desde 1982 (Nauditt *et al.*, 2014). En 1987 se inició la recuperación de oxidados de cobre mediante pilas de lixiviación (Ramírez, 2015), hasta su cierre en el año 2009, continuando el procesamiento del material en la Planta Delta, cercana al lugar. Desde la adquisición de ENAMI el material derivado al tranque era proveniente de la misma planta, pero antes de esa fecha la información de la proveniencia del material es escasa.

La planta posee tres tranques de relaves, enumerados del 1 al 3 por orden de antigüedad, siendo el tranque N°1 el más antiguo, seguido del tranque N°2 y finalmente el más reciente, el tranque N°3. La campaña de sondajes fue realizada con 52 pozos distribuidos en los tres tranques, totalizando 739,9 m perforados, e incluyendo el uso de una calicata como complemento a las perforaciones. Las técnicas utilizadas para la caracterización del material consisten en análisis granulométrico por difracción láser, espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX), en muestra total y fracción menor a 2 μm .



1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar química, textural y mineralógicamente el tranque de relaves N°2 de la Planta La Cocinera.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analizar las fases minerales presentes en el tranque y relacionarlas con la procedencia del material.
- Determinar la distribución granulométrica del tranque.
- Establecer la distribución y la variabilidad de concentración de elementos mayores, elementos menores y elementos trazas.
- Evaluar la posibilidad de recuperación de elementos de interés económico.
- Evaluar el riesgo para la salud humana.

1.2. Ubicación y Accesos

La Planta La Cocinera se encuentra a 405 km al norte de Santiago y a 6 km al noreste de la ciudad de Ovalle, en la Provincia de Limarí, Región de Coquimbo, Chile (Figura 1.2). Sus coordenadas geográficas son 30,55° latitud sur y 71,17° longitud oeste; a una elevación promedio de 285 m s.n.m. El acceso por tierra desde Santiago es mediante la ruta 5 Panamericana, tramo La Serena - Coquimbo, continuando por la ruta 45 hasta llegar a la ciudad de Ovalle, finalmente por la ruta 43 (salida norte de Ovalle), se debe tomar el camino secundario D-545. Por otra parte, colindante a la planta se encuentra el aeródromo El Tuquí (código IATA: OVL), pudiendo facilitar la llegada por aire a la ciudad de Ovalle.

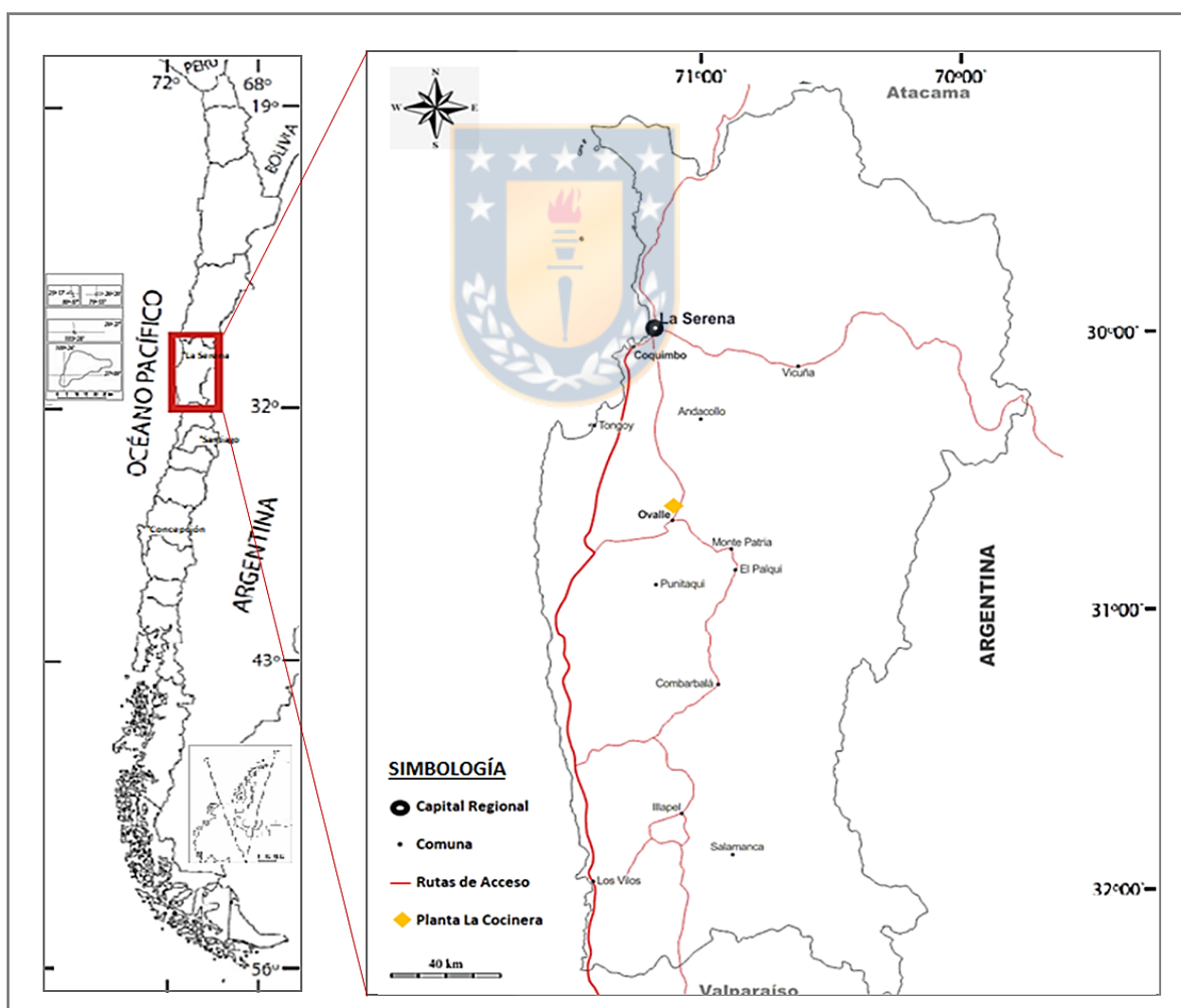


Figura 1.2:

Ubicación del área de estudio. Mapa de Chile y de la Región de Coquimbo con la ubicación de la Planta La Cocinera. Modificado de D-maps (2021).

1.3. Clima

La Región de Coquimbo posee un clima tipo estepárico, con vegetación arbustiva y condicionado por el Anticiclón del Pacífico. Hacia el interior predomina un clima de estepa cálida, caracterizado por la sequedad atmosférica. Las precipitaciones se concentran en los meses de invierno, con una precipitación anual promedio de 138,2 mm entre 1980-2010 (MMA, 2015). La ciudad de Ovalle se encuentra en el valle del río Limarí, llegando la influencia costera hasta unos 40 km hacia el interior por medio de los valles transversales y las quebradas; por lo que presenta una transición del clima semiárido con nublados abundantes, propio de la zona litoral, hacia un clima semiárido templado con lluvias invernales, propio de las zonas interiores de la región. El verano en Ovalle es árido y despejado; el invierno es frío, seco y nublado.

En la Figura 1.3 se observa un climograma de la ciudad de Ovalle, y durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de una mínima de 4,5 °C en invierno a una máxima 27,4 °C en verano. La temperatura media alcanza valores mínimos en invierno de 10,4 °C, mientras que en verano una media de 20 °C. Respecto a las precipitaciones, en los meses de verano son prácticamente 0 mm, pero en los meses de invierno pueden alcanzar una máxima de 36,8 mm en junio, siendo el mes más lluvioso (MMA, 2015).

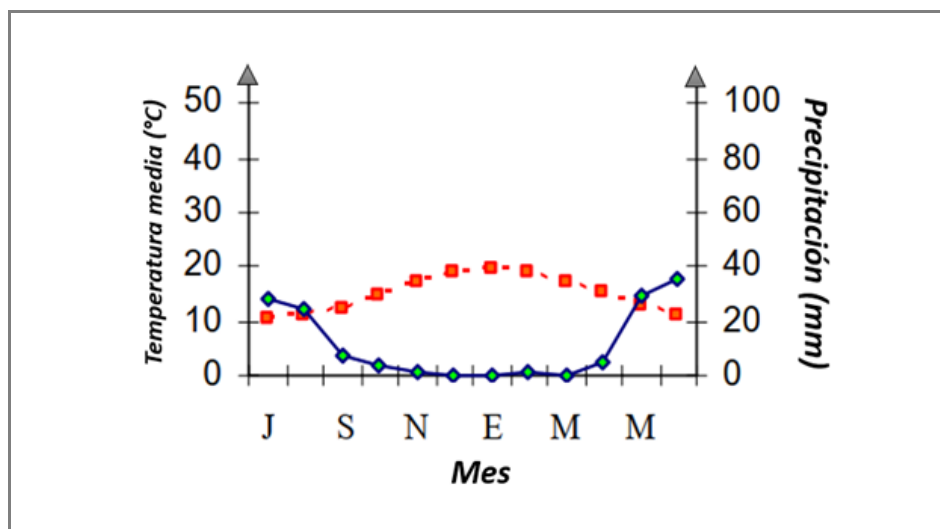


Figura 1.3: Climograma de la ciudad de Ovalle. Se observa la temperatura media (en rojo) y la precipitación (en azul) durante el transcurso de un año. Modificado de Fuentes (2007).

1.4. Contexto Histórico

Los tres relaves se encuentran dentro de la Planta La Cocinera, que desde el año 1982 hasta el 2009, fue propiedad de ENAMI, procesando el material proveniente de pequeños y medianos productores de la provincia, pero principalmente el material de la mina Panulcillo, próxima a la planta y también propiedad de ENAMI, pero explotada por un tercero. Dentro de La Cocinera, también se encuentra una mina de Cu, caracterizada por una veta con mineralogía de pirita, calcopirita y bornita. Durante el periodo de propiedad de ENAMI, el tranque de relave deriva mayoritariamente del material procesado por la Planta La Cocinera, que comenzó a operar en 1987 con la recuperación de oxidados de cobre mediante pilas de lixiviación (Ramírez, 2015). El cierre de La Cocinera se llevó a cabo el año 2009, reubicando su actividad metalúrgica en la Planta Delta, inaugurada el 17 de agosto del mismo año y alojando la mina subterránea de Panulcillo, junto a una planta LIX-SX-EW (lixiviación-extracción por solventes-electroobtención) que procesa 400 ton/mes de cátodos de cobre de alta pureza (99,99% de Cu) y una planta de flotación construida y operada por ENAMI, con una capacidad de procesamiento de 60000 ton/mes de minerales sulfurados (ENAMI, 2011).

La mina Panulcillo ha sido explotada desde el siglo XIX, con diversas compañías que han sido propietarias en el tiempo. La mina La Cocinera, junto a la mina Panulcillo, fueron trabajadas desde inicios del siglo XX, labor a cargo de la compañía Central Chili Copper Mining Co. Ltd., instalando en Panulcillo una planta de fundición donde se utilizaba la pirita extraída de la mina como material fundente (González, 1954). En la actualidad La mina de Panulcillo está compuesta por cuatro zonas principales: Asunción, Panulcillo Alto, Panulcillo Bajo y Mina Delta; siendo esta última, la mina actual en actividad desde el año 2009, explotando sulfuros de cobre (Emparan & Pineda, 2006). Asunción corresponde a la mina más al norte del yacimiento, siendo un laboreo antiguo donde se explotaba óxidos de cobre. Más al sur se encuentran las tres zonas restantes, relativamente cerca entre ellas, pero a distintas cotas de altitud; en la zona más superficial se encuentra Panulcillo Alto, que corresponde a laboreos antiguos y rajos subterráneos, explotando óxidos de cobre desde la superficie hasta 40 m de profundidad. A mayor profundidad se encuentra Panulcillo Bajo, que se trata de la principal mina antigua, explotando sulfuros de cobre entre las cotas 700 y 570 m. Finalmente, entre las cotas 545 y 445 se sitúa la Mina Delta, siendo la mina actual en actividad desde el año 2009, explotando sulfuros de cobre (Emparan & Pineda, 2006). Por lo que, a niveles

más superficiales, la explotación se centra en óxidos de cobre, mientras que a niveles subterráneos la explotación es de sulfuros de cobre.

ENAMI a través de la mina Panulcillo cumple una función de fomento a la pequeña minería de la región de Coquimbo, permitiendo regular el negocio minero cuando existen variaciones importantes de abastecimiento, que suelen estar determinadas por el precio del cobre. ENAMI mantiene el fomento a la pequeña minería mediante la compra y procesamiento de sus minerales, con una cuota entre 10000 a 15000 ton/mes y el resto del abastecimiento mineral mediante la mina base Panulcillo, con una cantidad de 45000 a 50000 ton/mes. El fomento y protección a la pequeña minería es parte de las actividades de ENAMI, incluyendo en el periodo de cuando La Cocinera era de su propiedad (ENAMI, 2011). Panulcillo como yacimiento minero, presenta recursos geológicos que se acercan a los 16 Mt, con una ley promedio de 1,3% de cobre total y 1,2% de cobre insoluble; ambos distribuidos en tres cuerpos mineralizados en dirección N-S: San Pedro, Intermedio y San Pablo. Se estima que en la historia del yacimiento se han explotado unos 7 millones de toneladas de mineral a una ley promedio de 2% de CuT (Castellón, 2017).

1.5. Metodología

El desarrollo del presente trabajo se basa a partir de tres etapas de trabajo realizadas de forma cronológica; se detallan a continuación:

1.5.1. Etapa de planificación

Las muestras representativas utilizadas en el presente trabajo fueron obtenidas previamente en el estudio solicitado por ENAMI al Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) y al Departamento de Ingeniería Metalúrgica, de la Universidad de Concepción, en el marco del proyecto ENAMI-Ovalle, en los tranques de relaves de la Planta La Cocinera, de la ciudad de Ovalle. La ubicación de los sondajes fue definida por los ingenieros de ENAMI, Gonzalo Vergara y Ricardo Quiroz; en conjunto con académicos del GEA, Dra. Ursula Kelm, Dr. Alexey Novoselov, Dr. Leopoldo Gutiérrez, Dr. Oscar Jerez y el geólogo Diego Delgado. Posteriormente, con el apoyo del jefe del proyecto de plan de cierre de planta, el ingeniero Juan Benavente, se ajustó la propuesta de sondajes, tomando en consideración los límites del relave, las zonas de residuos y escombros

del desmantelamiento de la planta, la posibilidad de acceso de la perforadora y el cuidado de zonas de revegetación.

1.5.2. Etapa de terreno

La campaña de sondajes de donde se obtuvieron las muestras representativas fue realizada por la empresa DENKEN Servicios Mineros LTDA. Los trabajos de perforación se iniciaron el día 2 de abril de 2018 y finalizaron el 14 de mayo del mismo año. Se realizaron 52 pozos de sondaje, con un total de 739,9 m perforados entre los 3 tranques. Para el tranque N°2 en estudio, fueron 24 pozos y 439,7 m del total, distribuidos como se muestran en la Figura 1.4. Se utilizó un sistema de sondaje sónico, que se caracteriza por no incorporar soluciones o sustancias, siendo lo más adecuado para la extracción de material desde un relave, y no alterar las muestras obtenidas.

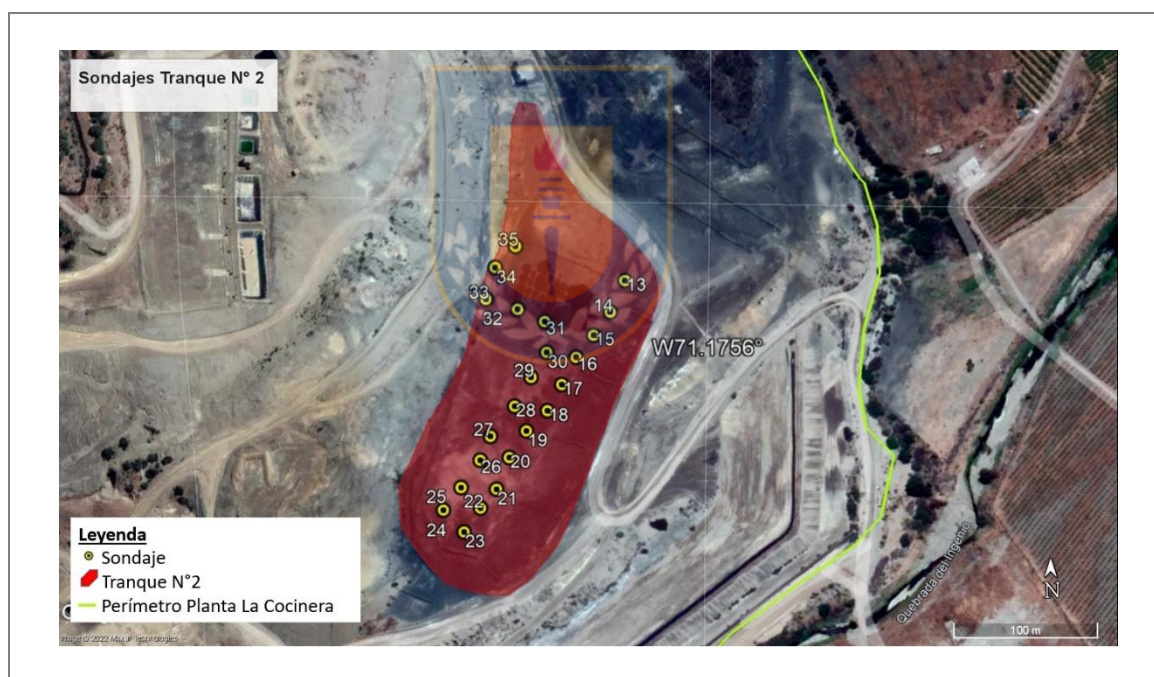


Figura 1.4: Vista satelital de sondajes del tranque N°2. Se observan los pozos de sondajes al interior del tranque de relaves N°2. Modificado de Google Earth.

De forma paralela a la toma de muestras, se procedió a la medición de humedad y pH, logrando obtener los parámetros en el estado más reciente de las muestras al momento de ser extraídas del tranque. Los equipos utilizados para las mediciones son los siguientes: medidor de humedad para suelos Lutron Electronic (modelo PMS-714) y medidor de pH para suelos Hanna Instruments (modelo HI 99121).

1.5.3. Etapa de laboratorio

La totalidad de las muestras fueron recibidas en el Instituto GEA, para realizar una caracterización química y física mediante análisis de laboratorio. Los análisis realizados fueron: humedad a 65 °C y 105 °C, análisis granulométrico por difracción láser, análisis químico por fluorescencia y difracción de rayos X. La medición de humedad se realizó con una estufa y una balanza analítica, en donde la muestra es calentada hasta los 60 °C por 1 hora, luego se deja secar a temperatura ambiente y se registra su peso; para los 105 °C el procedimiento es similar, utilizando la misma muestra calentada con anterioridad.

La granulometría fue medida por un analizador granulométrico láser marca Fritsch (modelo Analysette 22 Microtec Plus), donde las muestras fueron previamente humedecidas y sometidas a ultrasonido para lograr la máxima dispersión posible; el analizador granulométrico tiene un rango de medición de 0,08 a 2000 μm , lo que permite proporcionar información de diámetros distintivos como arena, limo y arcilla; junto a diámetros usados recurrentemente en procesamiento de minerales como D30, D50 y D80. El análisis por fluorescencia de rayos X fue realizado utilizando el equipo Rigaku ZSX Primus II (WDS), operado con radiación de Rh (sin estandarización), cuyos resultados quedan expresados en porcentaje elemental en masa, permitiendo identificar elementos mayores, menores y trazas. En análisis mineralógico mediante difracción de rayos X (en roca total y fracción argílica) fue realizado con el equipo Bruker D4 Endeavor, operado con radiación de Cu y filtro de radiación $K\beta$ de Ni.

1.5.4. Etapa de gabinete

Se genera la recopilación de información teórica para la elaboración del trabajo. Se interpretan los datos obtenidos en las etapas anteriores, con la finalidad de generar conclusiones y dar respuesta a los objetivos generales y específicos del trabajo.

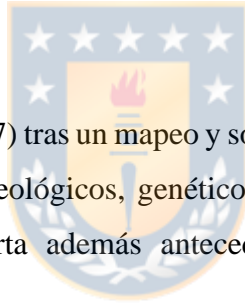
1.6. Trabajos Anteriores

El material depositado en el tranque de relaves es resultado, en gran parte, de las actividades mineras y metalúrgicas realizadas en la Planta La Cocinera, cuyo origen es variado, debido a que ENAMI compra material de diversas fuentes de pequeña y mediana minería, siendo escasa la

información entregada por la empresa. Los trabajos realizados con anterioridad son enfocados en la geología local y la actividad minera de la zona.

González (1954) realiza los primeros estudios geológicos y económicos del distrito minero de Panulcillo, enmarcado en la historia minera del yacimiento. Caracteriza las formaciones geológicas de la zona, la génesis, mineralogía y zonación del yacimiento Panulcillo.

Ruiz (1965) realiza los primeros trabajos sobre la geología de yacimientos metalíferos en la zona, que luego fue complementado por Thomas (1967) en la Hoja Ovalle; en donde la mineralización a nivel regional está dominada por una serie de estructuras geológicas y se reconocen skarns de cobre, ligados espacialmente a calizas del Miembro Superior de la Formación Arqueros. Destaca la mina Panulcillo como depósito tipo skarn, que se encuentra próximo a la planta, siendo parte de la primera compañía propietaria de La Cocinera y además se encuentra bastante información de la mina en la literatura.



Araya *et al.* (1998 en Castellón, 2017) tras un mapeo y sondajes en la mina Panulcillo, confeccionan un informe con los antecedentes geológicos, genéticos y mineros del distrito, enmarcado en el Proyecto Delta de ENAMI. Aporta además antecedentes sobre la geología estructural del yacimiento de Panulcillo.

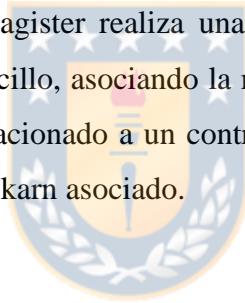
Sugaki *et al.* (2000) elaboran una publicación científica respecto a la mineralogía del yacimiento cuprífero de Panulcillo, caracterizando la mineralogía y paragénesis del skarn de cobre, como también proponen un modelo con las etapas de formación, que incluyen el metamorfismo, mineralización y alteraciones.

Rio Tinto Group (2001 en Castellón, 2017) elabora un informe en el marco del Proyecto Delta con información geológica y estructural del yacimiento Panulcillo, en donde también confeccionan un modelo genético para el metamorfismo de contacto y las etapas de mineralización del skarn, describiendo estilos de mineralización para el skarn presente en el yacimiento.

Ramírez (2015) como parte de su tesis doctoral, analiza la problemática de las pequeñas y mediana empresas en la industria minera de la Región de Coquimbo, identificando problemas críticos, principales actores y sus relaciones, centrándose en las problemáticas del proceso de obtención del mineral. En la planta identifica cinco agrupaciones mineras que aportan material, estas son: Ovalle, Andacollo, Punitaqui, El Huacho y La Serena; contribuyendo con minerales sulfurados de cobre, oxidados de cobre y oro, este último desde Andacollo.

Díaz & Corvalán (2015) son los precursores en proponer un modelo genético para el yacimiento Panulcillo como un depósito tipo IOCG de acuerdo a su mineralogía, alteraciones y evidencias de la falla Panulcillo y asociación al sistema de falla Romeral. Además estudiaron la asociación con otros depósitos IOCG y yacimientos con mineralización hidrotermal asociada al ascenso de magmas ricos en Fe-P.

Castellón (2017) en su tesis de magister realiza una caracterización geológica, geoquímica y estructural del yacimiento de Panulcillo, asociando la mineralización a un evento magmático y a un evento hidrotermal, también relacionado a un control geológico-estructural y redefiniendo el yacimiento como un IOCG con un skarn asociado.



1.7. Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi profesora guía Dra. Ursula Kelm por la oportunidad de realizar mi memoria de título bajo su tutela y en el marco del proyecto de ENAMI. Además, agradecer enormemente al Instituto de Geología Económica Aplicada, en especial al Dr. Alexey Novoselov, Dr. Oscar Jerez, Diego Delgado, Pablo Campos, Ximena Bruna, Mónica Uribe, Miriam Oliva, Miguel Jofré; a todo el cuerpo docente y funcionarios del GEA, gracias por la ayuda brindada.

También agradecer al Departamento de Ciencias de la Tierra, profesores y funcionarios, que brindaron su apoyo y conocimientos en mi paso durante la carrera, parte fundamental para mi desarrollo académico y profesional.

A mi familia y amigos, gracias a todos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos básicos

A continuación, se definen los principales términos usados en el presente trabajo:

Relave: es un subproducto del proceso minero, generalmente compuesto por roca molida, agua y minerales de ganga. Corresponde al material residual luego de separar los minerales con valor económico. En la minería de sulfuros de cobre, el relave es el material que sobra luego de la generación del concentrado (con un 20% a 30% de cobre), que se realiza mediante el proceso de flotación; luego, el material restante debe depositarse de forma segura (SERNAGEOMIN, 2021).

Depósito de relave: es una obra de ingeniería en donde se deposita y acumula el material de relave, y debe contar con las exigencias ambientales y normativa vigente. Existen diversos tipos de depósitos de relaves, los principales son: tranque de relave, embalse de relave, relave espesado, relave filtrado, relave en pasta, entre otros (SERNAGEOMIN, 2021).

Tranque de relave: obra de ingeniería construida para almacenar relaves. El material residual llega generalmente como una mezcla de lodo de partículas minerales finas y agua. El tranque se compone de un muro de contención que delimita la cubeta (volumen disponible para el depósito de relaves). Tras la decantación del material sólido en la cubeta, se genera una laguna de clarificación en la parte superior del tranque. En el tranque de relave el muro es construido con el material más grueso del relave, que se separa de la fracción más fina mediante hidrociclones, y luego se compacta (SERNAGEOMIN, 2021).

Arcilla: material de grano fino, que de acuerdo con la Clasificación de Wentworth, el tamaño de grano de sus partículas constituyentes es inferior a $1/256$ mm o $0,0039$ mm ($4 \mu\text{m}$). Desde un punto de vista mineralógico los minerales de arcilla pertenecen al grupo de los filosilicatos o silicatos en hojas, compuestos por capas tetraédricas y octaédricas de filosilicatos de aluminio hidratados; los tipos más comunes son clorita, illita, montmorillonita, esmectita, caolinita (Schlumberger, 2021).

Minería secundaria: actividad económica del sector primario, representada por la explotación y extracción de minerales desde residuos mineros (relaves). Junto con la recuperación de cobre remanente, se puede considerar el rescate de metales comunes como fierro magnético, molibdeno, algunos metales preciosos y tierras raras (CORFO, 2016).

Pozo de sondaje: perforación de pequeño diámetro y gran longitud realizada desde la superficie, que permite extraer muestras en profundidad para ser posteriormente analizadas y estudiadas. Los sondajes permiten llegar a profundidades de hasta 1200 m y dentro de las técnicas más utilizadas se encuentran la perforación diamantina y la perforación con recuperación de detritos o también llamado aire reverso (Ministerio de Minería, 2021a).

Calicata: técnica de prospección que se caracteriza por ser una excavación de pequeña o mediana profundidad, realizada generalmente con retroexcavadora, permitiendo la inspección directa del suelo que se desea estudiar, mediante tomas de muestras y la realización de ensayos de campo (SONAMI, 1999).

Difracción láser: técnica que mide la distribución del tamaño de partículas a partir de la variación angular de la intensidad de luz dispersada, cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas. Las partículas grandes dispersan la luz en ángulos pequeños en relación con el rayo láser, mientras que las partículas pequeñas dispersan la luz en ángulos grandes. En la Figura 2.1 se observa un esquema de la técnica desde la fuente de luz láser hasta el detector, midiéndose la variación angular de la luz dispersada al pasar a por un flujo de partículas (Cyr, 2001).

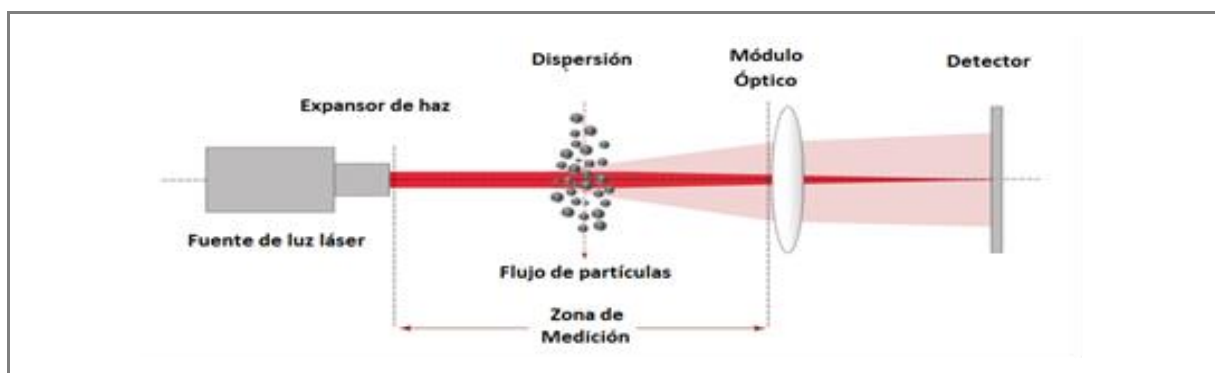


Figura 2.1: **Difracción láser.** Esquema de la técnica de difracción láser, en donde se realiza la medición de distribución de tamaños de un flujo de partículas mediante un láser, se mide la variación angular de la intensidad de la luz dispersada. Modificado de Sympatec GmbH (2021).

Fluorescencia de rayos X (FRX): técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación procedente de la muestra incluye los *peaks* de rayos X característicos de los elementos detectados; producidos por los saltos de los electrones entre los niveles de energía más internos de los átomos (Kumar, 2014). La técnica permite detectar elementos y obtener su concentración. En la Figura 2.2 se puede observar un esquema del procedimiento en donde un haz de rayos incide una muestra, generando una radiación de fluorescencia. Al incidir los rayos X, a nivel atómico un electrón puede ser expulsado de su orbital por la absorción de un fotón y luego un electrón de un orbital de mayor energía será transferido para suplir al electrón expulsado, durante esa transición un fotón puede ser emitido, por lo que al determinar la energía (longitud de onda) del fotón emitida por un elemento en particular, es posible determinar la identidad de ese elemento, y se debe a que la diferencia de energía entre dos orbitales, en un elemento en particular es siempre la misma, por lo que el fotón emitido cuando un electrón se mueve entre estos dos niveles siempre tendrá la misma energía (Jenkins, 1999).

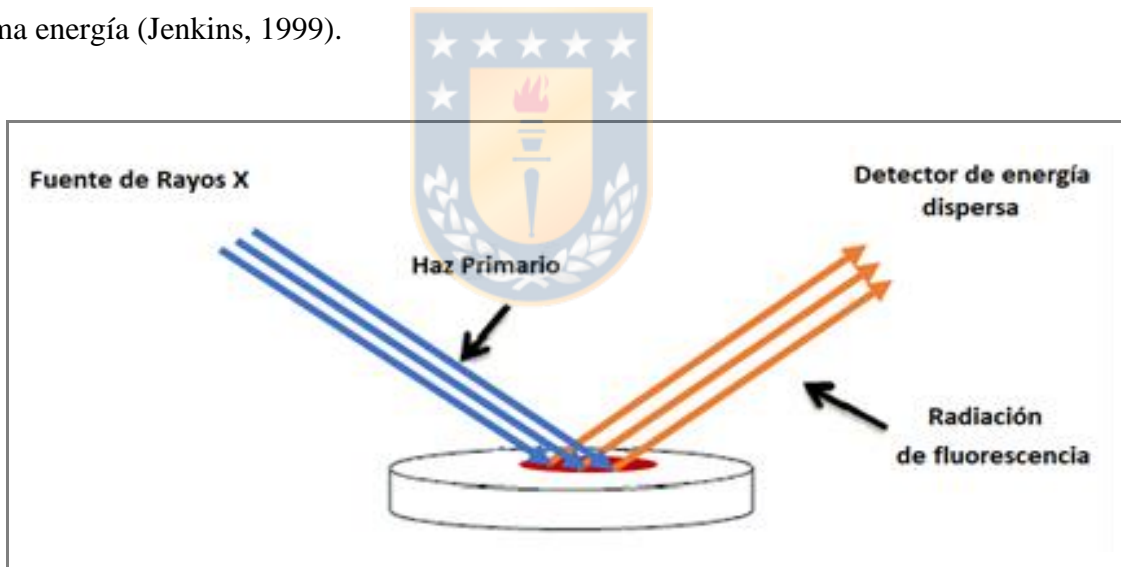


Figura 2.2: **Fluorescencia de rayos X.** Esquema de la técnica FRX en donde un haz primario de rayos X incide en una muestra, generando una radiación de fluorescencia para cada elemento detectado. Modificado de Tellería (2014).

Difracción de rayos X (DRX): técnica analítica no destructiva para el estudio y análisis de fases cristalinas, basada en el fenómeno de difracción de los rayos X, al interaccionar un haz de rayos X de una determinada longitud de onda con una sustancia cristalina. El fundamento de la técnica se basa en la interacción de la estructura cristalina con una fuente de rayos X, y en el caso de los minerales, la estructura atómica se repite de forma periódica en las tres direcciones del espacio,

generando planos que estarán distanciados entre sí. El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg (Ecuación 1):

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (1)$$

La ley relaciona la longitud de onda (λ) de los rayos X y la distancia interatómica (d) con el ángulo de incidencia (θ) del haz difractado (Bragg, 1913). En la Figura 2.3 se observa el esquema del modelo de Bragg, en donde cada familia de planos tiene una distancia (d), por lo que se detectarán los planos a diferentes ángulos, obteniéndose resultados según la estructura que se mida, lo que permite caracterizar las fases que componen la muestra en base a los diferentes *peaks* que se obtienen (interferencia constructiva). La intensidad de la radiación se mide en cuentas por segundo (cps). Las reflexiones de los planos de cada fase, obtenidas al finalizar el análisis, se comparan con valores tabulados en fichas, que se han obtenido y analizado previamente en laboratorio, bajo condiciones y muestras conocidas (Melgarejo, 2010).

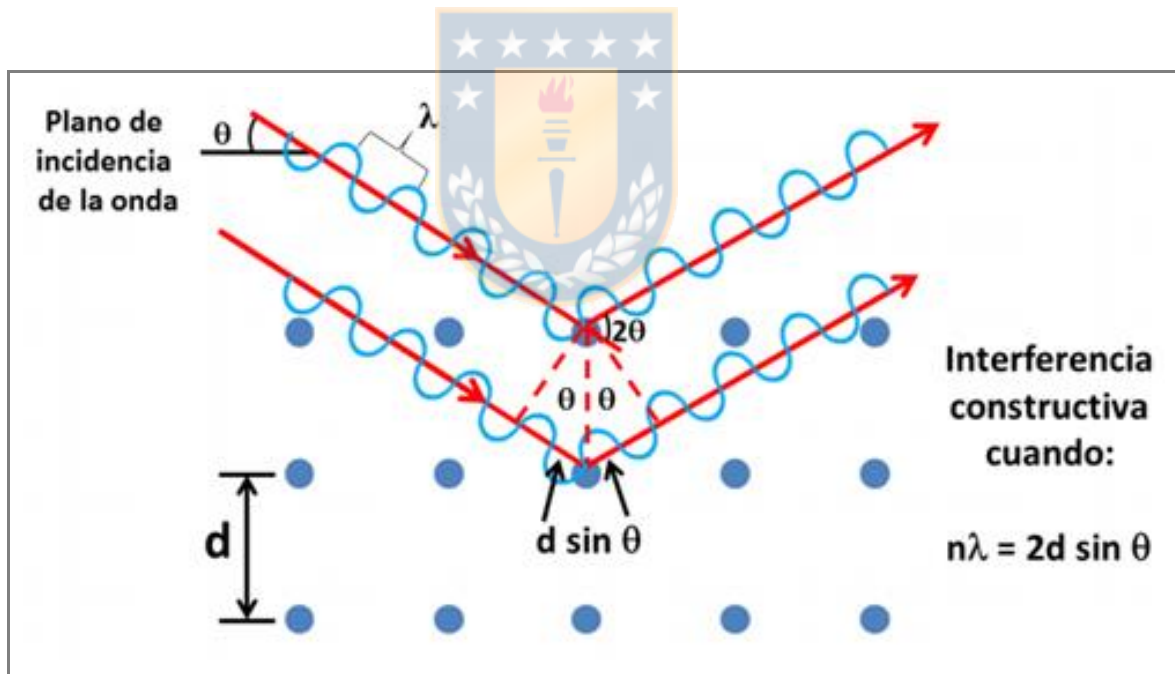


Figura 2.3: Difracción de rayos X. Esquema del modelo de Bragg, en donde (λ) es la longitud de onda del haz incidente de rayos X, (d) es la distancia interplanar, (θ) es el ángulo de incidencia entre los planos y el haz incidente. Modificado de LINAN (2021).

Elementos mayores: grupo de elementos que están presentes en concentraciones altas (>1%) y poseen un control en la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas. También controlan propiedades físicas como viscosidad y densidad en magmas y rocas (Lestussi, 2018)

Elementos menores: grupo de elementos que se encuentran en concentraciones bajas ($<1\%$ y $>0,1\%$) y generalmente sustituyen a algunos elementos en los minerales principales. Si se encuentran en concentraciones altas pueden llegar a formar minerales independientes, denominados minerales accesorios (Lestussi, 2018).

Elementos traza: grupo de elementos en donde su concentración es menor a 1000 partes por millón (ppm) o $<0,1\%$ de la composición de una roca, por lo que no forman fases independientes. Sustituyen a elementos mayores y menores en las estructuras minerales. La concentración y distribución de los elementos trazas pueden ser utilizados para estudiar las condiciones genéticas de un mineral (Lestussi, 2018).

2.2. Método del Hipercubo Latino

El muestreo por hipercubo latino (LHS, del inglés *latin hypercube sampling*) es un procedimiento estadístico para obtener muestras aleatorias en áreas con gran cantidad de información y variables, permite crear muestras con valores multidimensionales, a partir de una distribución conjunta (Deutsch, 2012). El método escoge valores de forma aleatoria y los distribuye uniformemente en la distribución definida para cada suposición. Para realizar el muestreo se necesita la selección de los parámetros y variables a muestrear, la asignación de distribuciones de probabilidad a cada una, la división de cada distribución en intervalos equiprobables, la generación de una muestra aleatoria dentro de cada intervalo y de cada variable, como también el apareamiento aleatorio de muestras entre variables; de modo que, para cada intervalo, es posible obtener un vector de entrada. Finalmente, el modelo es ejecutado una vez por cada vector de valores de entrada (Núñez & Barón, 1999).

El muestreo tiene como propósito obtener datos que permitan generar una estimación de algún parámetro estadístico, con la finalidad de proporcionar una forma eficiente de muestreo de variables a través de un procedimiento aleatorio estratificado (Minasny & McBratney, 2006).

El LHS se utiliza generalmente para análisis de incertidumbre y sensibilidad de parámetros en modelos matemáticos, permitiendo realizar un estudio del comportamiento del modelo frente a un

cambio en las variables de entrada, caracterizando la incertidumbre de la respuesta y en base a la sensibilidad, clasificar la importancia de aquellas respuestas (Liu *et al.*, 2015).

La técnica LHS se está utilizando a menudo, en comparación a otros métodos estadísticos, ya que permite disminuir en uno o más órdenes de magnitud las cantidades de corridas necesarias del modelo para una representatividad determinada. Al ser un muestreo estratificado, suministra una forma eficiente de muestrear variables, permitiendo una amplia gama de aplicaciones (Puerres *et al.*, 2021).



3. MARCO GEOLÓGICO Y MINERO

La planta La Cocinera se encuentra situada en la Región de Coquimbo, recibiendo material de la actividad minera de diversos puntos de la provincia y principalmente del distrito minero de Panulcillo. Para una mejor comprensión de la mineralización de los yacimientos que aportaron al relave, se describirá brevemente la geología regional y local de la zona.

3.1. Geología regional y local

La geología a nivel regional está constituida principalmente por rocas estratificadas y rocas intrusivas mesozoicas, junto a rocas metamórficas y graníticas que afloran hacia la costa, siendo rocas paleozoicas o más antiguas; además de rocas graníticas paleozoicas que afloran en la parte nororiental de la región (Thomas, 1967). Tanto en la faja costera como en la faja andina se encuentran unidades de rocas cristalinas paleozoicas, ya sea ígneas como metamórficas, con un predominio de formaciones volcánicas y volcanoclásticas del Cretácico, con intercalaciones sedimentarias marinas del Cretácico inferior, o continentales del Cretácico superior - Cenozoico (Strauch *et al.*, 2009). Las formaciones están cortadas por intrusivos graníticos también de edad cretácica o paleógena, lo que genera zonas de contacto, metasomatismo y alteraciones hidrotermales que aportan mineralización (Pineda & Emparan, 2006). A diferencia de otras partes de los Andes, no existe volcanismo cuaternario en la Región de Coquimbo, pero en términos tectónicos, se identifican dos grandes fases: una fase tectónica extensiva tipo Mariana (Jurásico al Cretácico inferior) y una fase tectónica compresiva (Cretácico superior) (Charrier *et al.*, 2007).

En la provincia de Limarí, localmente las rocas estratificadas se pueden describir como una secuencia marina y continental, evidenciando periodos de transgresiones y regresiones marinas, con alternancia de periodos de gran volcanismo (Pineda & Emparan, 2006).

Por una parte, se encuentra el complejo volcánico Agua Salada (Jurásico), que corresponde, principalmente, a una base constituida por una alternancia de lavas y tobas andesíticas; seguido de una unidad de ignimbritas con intercalación de andesitas y a techo una unidad hipabisal de andesitas porfídicas, además de pórfidos dioríticos y andesíticos que forman filones, *stocks* y

diques. El contexto de formación del complejo corresponde a un ambiente depositacional de gran actividad volcánica en un régimen extensivo, con depositación de material sedimentario en pequeñas cuencas. Presenta intrusivos dioríticos (151 a 143 Ma) y monzodioríticos-granodioríticos del Jurásico medio al Jurásico superior (Pineda & Emparan, 2006).

La Formación Arqueros (Cretácico inferior) sobreyace al complejo Agua Salada, y corresponde a una secuencia volcánica, de tipo andesítica-basáltica, con intercalaciones sedimentarias marinas. De piso a techo presenta lavas porfídicas (andesitas basálticas de piroxeno, basaltos de piroxeno-olivino y andesitas de anfíbol-piroxeno), seguido de basaltos y andesitas porfídicas; calizas y areniscas subordinadas (en parte, fosilíferas) y finalmente tobas y brechas piroclásticas con intercalación de lavas de piroxeno (de depositación subaérea). La formación presenta intrusivos graníticos y dioríticos del Cretácico inferior tardío (112 a 109 Ma), que están limitados por la falla Romeral hacia el oeste en el núcleo de la falla, los intrusivos se encuentran foliados, presentando cataclasitas y milonitas (Castellón, 2017). A causa de la intrusión de cuerpos ígneos, las rocas de la Formación Arqueros presentan metamorfismo de contacto, formando un sector de *hornfels* contiguo al contacto con los intrusivos y zonas de skarn en porciones más distales (Pineda & Emparan, 2006). En el contacto de los intrusivos con las rocas de caja, generalmente se presentan óxidos de Cu y calcopirita, con magnetita y hematita en la masa fundamental (Castellón, 2017).

Por sobre la Formación Arqueros se encuentra la Formación Quebrada Marquesa, perteneciente al Hauteriviano-Albiano temprano, y corresponde a una secuencia sedimentaria y volcánica, principalmente continental. Contiene un miembro de ignimbritas, tobas y brechas de caída, y luego un segundo miembro caracterizado por andesitas afaníticas de anfíbol-piroxeno y tobas de caída e ignimbritas poco soldadas. En la parte superior de la formación, en el sector de Quebrada Marquesa, se encuentra una secuencia manganesífera hasta su techo, en series de areniscas, lutitas y calizas, siendo los horizontes de manganeso más importantes, presentes en la mina El Romero y en las cercanías de Ovalle; también está representado y contiene las minas importantes como Arrayán, Corral Quemado, Porvenir, Fragua, San Pedro, entre otras (Thomas, 1967). La Formación Quebrada Marquesa es intruída por cuerpos graníticos a dioríticos (100 a 97 Ma), definidos por monzogranitos de anfíbol-biotita. También existen intrusivos monzograníticos a dioríticos (95 Ma), que se presentan como *stocks* elongados de diorita cuarcífera de anfíbol-piroxeno y

diorita; y por último intrusivos hipabisales andesíticos y basálticos-dioríticos (94 a 92 Ma), constituyendo pequeños *stocks* y diques ocoíticos y porfídicos-afaníticos (Pineda & Emparan, 2006).

Las rocas cenozoicas en la zona contemplan dos formaciones sincrónicas del Mioceno-Pleistoceno, la Formación Coquimbo, que corresponde una secuencia sedimentaria marina, con facies de areniscas limosas y calizas bioclásticas; por otra parte, la Formación Confluencia, correspondiente a depósitos continentales fluviales, aluvionales y lacustres, con facies de conglomerados, brechas matriz-soportadas y areniscas arcósicas-calcáreas. Las unidades más recientes, tanto del Pleistoceno y Holoceno, corresponden a depósitos de diverso origen, entre los que se encuentran aluvionales, fluviales, coluviales, eólicos y marinos (Emparan & Pineda, 2006).

3.2. Distritos Mineros

Los distritos mineros en la región se encuentran relacionados a las franjas metalogénicas presentes, la mayor cantidad asociadas principalmente a la franja metalogénica del Cretácico inferior, por lo largo de la cordillera de la Costa del norte de Chile; en menor medida a la franja metalogénica del Cretácico superior y por último la franja metalogénica del Neógeno (Zentilli, 1974).

En la franja del Cretácico inferior se incluyen depósitos de pórfidos cupríferos, la mayor parte subeconómicos, con excepción de Andacollo, actualmente en explotación y con una ley de oro de 0,10 g/t, siendo la mayor del país en un pórfido Cu-Mo en explotación. El yacimiento presenta una ley 0,31% Cu y una reserva de 470 Mt (Villela & Cantallopts, 2016). Andacollo se encuentra hospedado en rocas volcánicas de la Formación Quebrada Marquesa y en un pórfido granodiorítico de biotita. Los minerales hipógenos de mena corresponden a pirita, calcopirita contenidos en un *stockwork* de cuarzo diseminados en la roca huésped. Los *stockwork* son estructuras asociadas a pórfidos cupríferos en forma de vetillas, donde el relleno se compone de mena, especialmente de minerales de formación hidrotermal. Las rocas con alteración hidrotermal presentan una zonificación interior de biotita-feldespatos potásicos, rodeada de una asociación de feldespatos potásicos, cuarzo, sericita; y luego una zona final de cuarzo-sericita (Llaumett *et al.*, 1975). Hacia el oeste del pórfido de Andacollo existe mineralización de Cu-Au en vetas y en cuerpos

estratoligados. En rocas volcánicas próximas a los intrusivos dioríticos y granodioríticos del Albiano, se hospedan yacimientos de Fe (magnetita-apatito), los que están bajo el dominio meridional del sistema de falla de Atacama, corresponden a los distritos de Cerro Imán, Bandurrias, Boquerón Chañar, Algarrobo, Romeral y el Tofo. En el mismo sector de los yacimientos de Fe existen algunos de óxidos de Fe (Cu-Au), como Manto Verde y Candelaria. En rocas sedimentarias volcanoclásticas se alojan depósitos estratoligados como Cerro Negro y Talcuna; además de depósitos de skarn cupríferos en zonas de contacto entre intrusivos del Albiano y calizas de inicios del Cretácico inferior, destacándose los distritos de La Campana y Panulcillo. Los yacimientos de skarn están formados por metamorfismo de contacto a causa de la intrusión de rocas ígneas en rocas sedimentarias carbonatadas (calizas o dolomitas), ocurre a una temperatura entre 400 a 600 °C, generando minerales calco-silicatados, como variedades cálcicas de granates (andradita y grosularia), piroxenos, piroxenoides y anfíboles (Villela & Cantallopis, 2016). En el caso de Panulcillo, se emplaza en rocas carbonáticas de la Formación Arqueros, en la zona cataclástica de la falla Romeral. Los recursos geológicos del yacimiento de Panulcillo ascienden a las 16 Mt con una ley media de 1,3% Cu total (ENAMI, 2016).

En la franja metalogénica del Cretácico superior se incluyen vetas mesotermiales a epitermales de oro y plata, en donde la mayor parte corresponden a vetas de tipo cuarzo-sulfuros-oro con variaciones de cobre. En la Región de Coquimbo se encuentran 3 yacimientos; Arqueros (vetas de Ag), El Espino y Farellón Sánchez; las dos últimas corresponden a vetas de Au-Cu (Maksaev, 2001).

La franja metalogénica del Neógeno también tiene presencia en la región, conteniendo los pórfidos cupríferos más importantes del país. En la Región de Coquimbo se encuentra el yacimiento Los Pelambres del Mioceno superior y Plioceno inferior. En la alta cordillera existen yacimientos epitermales de metales preciosos, principalmente tipo sulfato-ácido, como Pascua-Lama, El Tambo y El Indio; en este último se ha encontrado la existencia de mineralización de tipo pórfido cuprífero en niveles profundos del distrito (Maksaev, 2001).

Al noroeste de Andacollo, entre las quebradas Mal Paso y La Cortadera, en las rocas del complejo intrusivo Cerro El Chivato (103 Ma), se presentan vetas de oro asociadas a cobre, en donde las

rocas fueron afectadas por una alteración propilítica, siendo en algunas zonas de carácter intenso, con presencia de clorita y epidota, ambas penetrativas, reemplazando fenocristales, formando cúmulos y vetillas; con frecuencia acompañado de calcita que reemplaza a cristales de plagioclasa. En zonas con alteración hidrotermal argílica y fílica, se sitúan minas como El Rubio, Farellón, El Jardín y La Litre, donde predominan los minerales oxidados de Cu. En el sector de los cerros El Fraile y Los Tres Picos, al noreste de Andacollo, existen yacimientos auríferos en rocas de intrusivos monzoníticos a dioríticos (95 Ma), los que corresponden a la mina Huancara y mina La Monja; y a unos 18 km al norte de Andacollo se encuentran las minas El Quemado y La Mollaquita, en el sector Cerro Blanco. La erosión de los yacimientos de oro originó la formación de placeres auríferos en los sectores de Eliana, Los Maitenes y Las Loicas (Emparan & Pineda, 2006).

En el sector de La Caldera, al sureste de Andacollo, se localizan numerosas minas de explotación de depósitos de cobre tipo manto, alojados en el contacto de rocas sedimentarias clásticas de la Formación Quebrada Marquesa con intrusivos hipabisales andesíticos basálticos-dioríticos (96 a 94 Ma), presentando minerales como oxidados de Cu, limonitas, calcopirita y pirita (Emparan & Pineda, 2006).

En el distrito de Tambillo también existen depósitos de cobre y cobre-cobalto, emplazados en las rocas sedimentarias clásticas de la Formación Arqueros que forman skarns de granate y anfíbol. Al sur de Tambillo se encuentran las minas Florida, Buitre y Minilla, correspondientes a mantos de Cu-Co en donde los minerales primarios están diseminados (calcopirita, magnetita, arsenopirita cobaltífera, blenda). Por otra parte, en los mantos al norte de El Pehón se encuentran las minas de cobre San Cristóbal y Verde, con presencia de pirita y calcopirita. Entre el Pehón y Tambillo, la mineralización se encuentra presente en vetas de la Formación Arqueros y en los intrusivos hipabisales, observándose en las minas El Chavito, Mercedes, Filomena, Socorro y Pepita; donde la asociación mineralógica corresponde a pirita y calcopirita, acompañada de magnetita. Al oeste de Tambillo se presentan vetas de cobre-apatita en la mina San Felipe, donde la mineralización es de apatita con calcopirita; y al este del distrito se presentan vetas de cobre en las minas Culebra, Belloncito y Bollen, emplazadas en las ocoítas de la Formación Arqueros, con mineralización de calcosina, calcopirita y pirita (Emparan & Pineda, 2006).

El distrito El Cobre, se exhiben vetas de cobre ubicadas en el contacto de tobas de la Formación Quebrada Marquesa con intrusivos hipabisales (105 Ma), con mineralogía primaria de bornita y calcopirita; las minas existentes son San Lorenzo, Caly, Altamira y Las Violetas (Emparan & Pineda, 2006).

En las cercanías del poblado El Manzano, en el sector El Romeral, flanco oriental de la falla El Álamo, se encuentran minas de manganeso, emplazadas en metareniscas rojas de la Formación Quebrada Marquesa, con mineralogía principal de pirolusita y braunita, acompañados en menor medida por psilomelano y magnetita (Emparan & Pineda, 2006).

3.3. Minería no metálica

Los recursos no metálicos más explotados son los carbonatos, provenientes de calizas bioclásticas (coquinas) en el litoral de la Región de Coquimbo, como también en carbonatos emplazados en rocas de la unidad de intrusivos hipabisales y rocas volcánicas de algunas facies de la Formación Arqueros (Emparan & Pineda, 2006).

El cuarzo ha sido explotado en diversas minas en la quebrada Talca, emplazadas en *stocks* de intrusivos monzoníticos a dioríticos (95 Ma) (Emparan & Pineda, 2006).

Los depósitos de fosfatos, principalmente apatita, se encuentran en diversos lugares, generalmente en vetas, por el norte en la quebrada Barrales, también emplazadas en rocas del complejo volcánico Agua Salada, adyacente a la falla Romeral; por el lado sur, en la quebrada El Sauce. También se encuentran en la quebrada El Toro, del sector Tambillo, emplazadas en andesitas de la Formación Arqueros. Las leyes de óxido de fósforo (P_2O_5), varían entre 21,83% a 28,00% (Emparan & Pineda, 2006).

La baritina se encuentra en vetas, principalmente en 2 zonas, la primera es la zona del embalse Recoleta, donde las vetas se encuentra en 3 sectores: en el sector Laguna Verde las vetas se alojan en rocas de la unidad de intrusivos hipabisales (94 a 92 Ma), en el sector Bulrreme se alojan en rocas piroclásticas de la Formación Quebrada Marquesa y en el sector de Recoleta se encuentran

en andesitas de la Formación Arqueros; finalmente la segunda zona es Cuesta de Piedra, en donde las vetas se emplazan en rocas andesíticas-basálticas de la Formación Quebrada Marquesa (Emparan & Pineda, 2006).

La diatomita o tierra de diatomeas es una roca sedimentaria silíceas de origen fosilífero, y junto al caolín, han sido extraídos como recursos no metálicos en la zona. Principalmente se sitúan en el área de la cuenca cenozoica cercana a Puerto Aldea. Las diatomeas han sido explotadas en las minas Plegaria y Tongoy, situadas en el sector de Loma de Piedra, cuyos mantos se emplazan en las facies de areniscas finas limosas de la Formación Coquimbo; mientras que el caolín se localiza en el lado oriental de la quebrada Pachingo y al sur de la quebrada Los Pocitos, también en facies de la Formación Coquimbo (Emparan & Pineda, 2006).



4. CARACTERIZACIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES

La caracterización del tranque de relaves se realizó en base a la selección de muestras representativas obtenidas de un total de 24 sondajes, que totalizaron 439,7 m (distribución exhibida anteriormente en la Figura 1.4), en donde se extrajeron compósitos cada 1 metro (en los tramos finales fueron fracciones de metro). Se totalizó un universo de 264 muestras para el tranque, a las que se le realizó medición de pH, humedad, junto a análisis FRX y difracción láser. A partir de los datos obtenidos, se seleccionaron nueve muestras representativas mediante el método estadístico del Hipercubo Latino (LHS), bajo la supervisión y el apoyo del Dr. Alexey Novoselov.

Las muestras resultantes se basaron en nueve criterios importantes para la descripción de relaves, los cuales fueron los elementos Zn, Fe, Mn, S, Cu, P y los parámetros H105 (humedad a 105 °C), D80 y 4 μm (Tabla 4.1). Con el método estadístico LHS se seleccionaron nueve muestras de un universo de n=264 (cantidad muestras consideradas), en donde el procedimiento parte agrupando las muestras en familias y luego va generando grupos de familias. Para el tranque N°2 se formó la Familia 1, que alberga subgrupos de familias de muestras de hasta dos niveles más reducidos, teniendo un nivel de cuatro subfamilias (1.1, 1.2, 1.3, y 1.4), que además albergan un nivel más pequeño de familias. El detalle de las muestras y subfamilias que componen la Familia 1 se encuentra en el Anexo I: Muestreo de Hipercubo Latino.

Tabla 4.1: Muestras seleccionadas. El nombre de la muestra se compone del pozo del sondaje y del metraje correspondiente.

Variable	N° Pozo	Rango profundidad (m)	Nombre muestra
Zn	13	1,0-2,0	Pz 13: 1,0-2,0
Fe	14	9,0-10,0	Pz 14: 9,0-10,0
H105	15	7,0-8,0	Pz 15: 7,0-8,0
Mn	15	9,0-10,0	Pz 15: 9,0-10,0
D80	31	17,0-17,6	Pz 31: 17,0-17,6
S	33	0,0-0,5	Pz 33: 0,0-0,5
Cu	33	3,0-4,0	Pz 33: 3,0-4,0
P	34	8,0-9,0	Pz 34: 8,0-9,0
4μm	35	8,0-9,0	Pz 35: 8,0-9,0

El nombre de cada muestra indica el número del pozo y el rango de profundidad de la muestra en el sondaje en metros. Las variables que no son elementos fueron escogidas debido a su importancia en el estudio de relaves, H105 corresponde a la humedad medida a 105 °C, lo que permite visualizar

el comportamiento de las arcillas respecto a la retención de agua que puedan tener. La variable D80 corresponde al máximo de partículas en la fracción que contiene el 80% más fino del material, importante en el proceso de flotación. El parámetro de 4 μ m permite caracterizar la granulometría más fina tamaño arcilla.

4.1. pH y humedad

La medición de pH se realizó en la totalidad de las muestras con un medidor de pH para suelos Hanna Instruments (modelo HI 99121), antes de medir la humedad en laboratorio. La medición de humedad se realizó en terreno y en laboratorio, en donde la primera medición se realizó in situ en la etapa de muestreo, utilizando un medidor de humedad para suelos Lutron Electronic (modelo PMS - 714). Posteriormente, se midió la humedad en laboratorio a 60 °C y 105 °C, utilizando balanza analítica y una estufa. El procedimiento estándar que se aplica consiste en calentar la muestra a 60 °C por 1 hora y luego dejar enfriar hasta temperatura ambiente en desecador y obtener peso constate. El procedimiento para la a humedad a 105 °C es análogo al de 60 °C. En la Tabla 4.2 se presentan los datos obtenidos de las mediciones para cada muestra correspondiente.

Tabla 4.2: Mediciones de humedad y pH. Humedad medida en terreno (HT), a 60 °C (H60), a 105 °C (H105) y pH en laboratorio (pHL).

Muestra	HT (%)	pH L	H60 (%)	H105 (%)
Pz 13: 1,0-2,0	6,15	7,46	3,62	4,04
Pz 14: 9,0-10,0	18,20	7,97	14,64	14,74
Pz 15: 7,0-8,0	55,00	8,02	34,20	34,20
Pz 15: 9,0-10,0	24,90	8,33	17,65	17,94
Pz 31: 17,0-17,6	11,25	6,62	11,28	12,74
Pz 33: 0,0-0,5	6,55	7,51	7,45	8,42
Pz 33: 3,0-4,0	5,95	7,86	8,72	9,00
Pz 34: 8,0-9,0	7,50	8,39	5,52	6,12
Pz 35: 8,0-9,0	55,00	7,76	21,04	21,04

Según el valor de pH que tenga un suelo, es posible clasificarlo dentro de un rango desde “fuertemente alcalino” a “extremadamente ácido” (Tabla 4.3). Los datos de pH obtenidos en análisis de laboratorio muestran un pH promedio de 7,7; lo que se podría clasificar como un pH “ligeramente alcalino” según la clasificación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1998).

4.2. Descripción Macroscópica

La descripción macroscópica fue realizada luego del secado de las muestras y sirve como primer indicio para el reconocimiento y descripción de la mineralogía y texturas presentes, antes de realizar análisis de rayos X. Se llevó a cabo mediante lupa binocular marca Nikon (modelo SMS - 10), con aumento de 40X. Al tratarse de material no consolidado, se confeccionaron fichas de descripción para las muestras, a partir de fichas de descripción de rocas sedimentarias, pero con los criterios que son posibles de obtener mediante observación macroscópica. En la Tabla 4.3 se sintetiza la información macroscópica observada.

Tabla 4.3: Descripción macroscópica. Tabla resumen con la principal información observada mediante análisis macroscópico.

Muestra	Aspecto	Textura	Color Sup. Fresca	Color Sup. Alterada	Compacidad	Tamaño de Grano	Forma de Grano	Minerales Observados
Pz 13: 1,0-2,0	Granular	Detrítica	Gris	Gris parduzco	Microporoso	Arena fina	Subprismoidal/ Subangular	Cuarzo, plagioclasa, piritita
Pz 14: 9,0-10,0	Granular	Detrítica	Gris	Gris verduzco	Microporoso	Limo	Esférico/ Subangular	Cuarzo, olivino, piritita
Pz 15: 7,0-8,0	Granular	Detrítica	Gris claro	Gris verduzco	Compacto	Limo arcilloso	Esférico/ Subangular	Cuarzo, calcita, arcilla
Pz 15: 9,0-10,0	Granular	Detrítica	Café grisáceo	Gris anaranjado	Compacto	Limo	Esférico/ Subangular	Cuarzo, granate, arcilla
Pz 31: 17,0-17,6	Granular	Detrítica	Café pardo	Café amarillento	Microporoso	Arena fina	Esférico/ Subangular	Cuarzo, plagioclasa, hematita
Pz 33: 0,0-0,5	Granular	Detrítica	Gris	Gris pardo	Microporoso	Arena fina	Esférico/ Angular	Cuarzo, magnetita, hematita
Pz 33: 3,0-4,0	Granular	Detrítica	Gris pardo oscuro	Gris pardo claro	Microporoso	Arena fina	Subprismoidal/ Subangular	Cuarzo, plagioclasa, piritita
Pz 34: 8,0-9,0	Granular	Detrítica	Gris pardo claro	Café pardo	Compacto	Limo	Subprismoidal/ Subangular	Cuarzo, plagioclasa, arcilla
Pz 35: 8,0-9,0	Granular	Detrítica	Gris	Gris pardo	Compacto	Limo arcilloso	Esférico/ Subredondeado	Cuarzo, calcita, arcilla

Los principales datos obtenidos fueron: aspecto, textura, color, compacidad, coherencia, tamaño de grano, forma de grano, composición reconocible. El aspecto y la textura es igual para las nueve muestras, presentando un aspecto granular y una textura detrítica, ya que se trata de un material no consolidado compuesto de partículas (granos). Al ser un material disgregado también se otorgó una coherencia deleznable a todas las muestras, es decir, que se puede romper o deshacer fácilmente.

La compacidad se determinó por la capacidad de absorber una gota de agua, y debido al tamaño del grano, variaba entre compacto (menor capacidad) a microporoso (mayor capacidad). El tamaño de grano y microglómeros se estimó visualmente entre arena fina, limo y limo arcilloso, apoyado además de la sensación al tacto entre los dedos, en donde era posible sentir granos levemente más gruesos en las muestras con presencia de tamaño arena. La forma de los granos se estimó en la observación con lupa y contempla esfericidad y redondez; presentando formas esféricas o subprismoidales (más alargadas); además de una redondez subangular en la mayoría de las muestras, es decir, presencia de puntas, pero poco angulosas. En la composición de las muestras fue posible observar cuarzo, plagioclasa, pirita, arcilla y posiblemente granate, magnetita y hematita, pero el tamaño de grano dificultó un reconocimiento más preciso, por lo que gran parte de los granos se clasificaron como indeterminados. Pese a lo anterior, el color de las muestras puede ayudar a estimar o generar una idea de composición, y la mayoría de las muestras presentan un color gris, que puede variar con tonalidades verdes, pardas o rojizas. Los colores oscuros a negros se pueden asociar a la presencia de sulfuros, posiblemente pirita y ferromagnesianos. Los tonos más pardos y rojizos pueden tener relación con la presencia de hematita y granates, mientras que los tonos verdosos podrían significar presencia de clorita y arcillas (illita).

Las fichas de descripción macroscópica para cada muestra se encuentran en el Anexo II: Análisis Macroscópico.

4.3. Análisis Granulométrico por Difracción Láser

La distribución granulométrica de las muestras fue estudiada mediante un analizador granulométrico laser marca Fritsch (modelo Analysette 22 Microtec Plus), que utiliza una técnica de difusión de luz monocromática, en donde se genera una difracción del rayo incidente al interactuar con la muestra pulverizada; por lo que la difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula, a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada. Finalmente se procesan los datos de la intensidad de dispersión angular, para calcular el tamaño de las partículas responsables de crear el patrón de dispersión. Las muestras son previamente sometidas a ultrasonido, para lograr la máxima dispersión posible. El analizador granulométrico tiene un rango de dispersión de 0,08 a 2000 μm , lo que permite obtener histogramas de distribución,

información de las proporciones granulométricas de las muestras (arena, limo y arcilla), además de distintos diámetros de partículas (D) que permiten calcular el coeficiente de curvatura (CC) y coeficiente de uniformidad (CU); la información anteriormente mencionada se muestra en la Tabla 4.4. El detalle del análisis para cada muestra se encuentra en el Anexo III: Análisis Granulométrico por Difracción Láser.

Tabla 4.4: Caracterización granulométrica por difracción láser. Parámetros obtenidos en base a análisis de difracción láser.

Parámetro	Pz 13: 1,0-2,0	Pz 14: 9,0-0,0	Pz 15: 7,0-8,0	Pz 15: 9,0-10,0	Pz 31: 17,0-17,6	Pz 33: 0,0-0,5	Pz 33: 3,0-4,0	Pz 34: 8,0-9,0	Pz 35: 8,0-9,0
Arena (%)	37,6	0	0	0	52,7	36,5	53,8	12,2	0
Limo (%)	52,4	85,2	68,2	77,3	39,2	56,7	38,6	71,1	72,2
Arcilla (%)	10	14,8	31,8	22,7	8,1	6,8	7,6	16,7	27,8
D10 (µm)	2	1,3	0,7	0,9	2,4	2,6	2,4	1,2	0,8
D30 (µm)	12,2	5,1	1,9	2,8	12,9	18,5	23,1	4,5	2,2
D50 (µm)	51,4	11,3	3,8	6,2	88,5	43,9	84,7	11,2	4,4
D60 (µm)	70,1	15,1	5,2	8,7	145,9	64,8	111,7	17,3	6
D80 (µm)	104,8	25	9,6	15,8	272,9	124,8	170,2	60	11,3
-100# (%)	94,4	100	100	100	60,2	85,8	72,6	99,9	100
-325# (%)	46,7	96,4	100	99,8	42	49,5	36,1	70,3	99,7
4µm (%)	16,1	25,3	51,6	38,5	15,3	11,5	12,5	27,8	47,3
Moda	Trimodal	Bimodal	Unimodal	Bimodal	Trimodal	Trimodal	Trimodal	Trimodal	Unimodal
CU	35,1	11,6	7,4	9,7	60,8	24,9	46,5	14,4	7,5
CC	1,1	1,3	1,0	1,0	0,5	2,0	2,0	1,0	1,0

Respecto a la distribución modal observada en las nueve muestras, predomina la distribución trimodal presente en cinco muestras; luego, en menor medida, las distribuciones bimodales y unimodales, cada una presente en dos muestras. Las distribuciones trimodales están correlacionadas con granulometrías gruesas, específicamente las que presentan arena, junto a limo y arcilla, pudiéndose observar en el histograma de la muestra Pz 13: 1,0-2,0 (Figura 4.1), en donde se evidencia la presencia de tres modas. Las distribuciones unimodales y bimodales destacan por la ausencia de granos tamaño arena, predominando el tamaño limo por sobre el tamaño arcilla en las cuatro muestras, tanto bimodales como unimodales.

Respecto al parámetro D80, diámetro importante en el procesamiento de minerales, molienda y flotabilidad, correspondiendo al máximo de partículas en la fracción que contiene el 80% más fino del suelo (Runge *et al.*, 2003). Los valores mayores, por sobre los 100 μm , se encuentran en las muestras con distribuciones trimodales, llegando a un máximo valor D80 de 272,9 μm en la muestra Pz 31: 17,0- 17,6. Por consiguiente, los valores más bajos de D80 se encuentran en las muestras con distribuciones unimodales y bimodales.

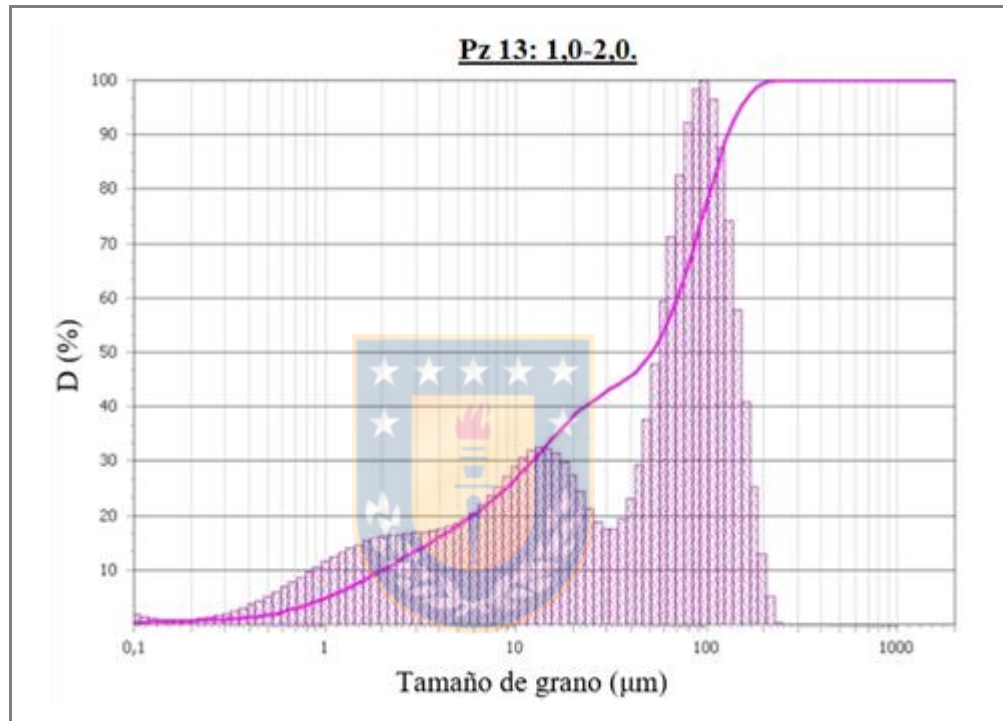
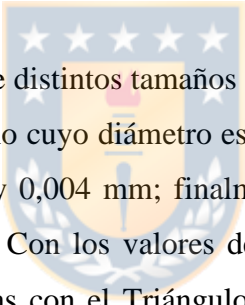


Figura 4.1: Histograma de distribución muestra Pz 13: 1,0-2,0. Se pueden observar 3 modas que van ascendiendo de izquierda a derecha.

Con los valores de D10, D30 y D60 es posible calcular el coeficiente de curvatura (CC) y el coeficiente de uniformidad (CU). El coeficiente de curvatura es un indicador del equilibrio relativo que existe entre los diferentes rangos de tamaño de partículas presentes, mientras que el coeficiente de uniformidad es la relación entre el diámetro correspondiente al 60% del peso del material y el diámetro por el que pasa el 10% del material (Lambe & Whitman, 2004). Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, del inglés *Unified Soil Classification System*), un suelo se considera bien graduado (W, del inglés *well graded*) cuando cumple que $CU \geq 6$ y $1 < CC < 3$, en el caso contrario, el suelo se clasifica como de baja graduación (P, del inglés *poorly graded*) (USDA, 2012). De las nueve muestras, todas cumplen el primer criterio de coeficiente de

uniformidad mayor a 6; pero solo la muestra Pz 31: 17,0- 17,6 no cumple el segundo criterio, ya que posee un valor de 0,5 de coeficiente de curvatura, por lo que sería la única muestra que se clasifica con baja graduación (P), ya que no cumple los dos criterios a la vez. Las cinco muestras restantes cumplen con ambos criterios y se pueden clasificar bien graduadas (W).

Los valores obtenidos de los tamaños de malla principales son $-325\#$ y $-100\#$, ambos al tener el símbolo (-), indican que el porcentaje obtenido pasan a través del tamiz, mientras que el símbolo (#) indica el número del tamiz mediante la Norma Tyler, teniendo como equivalencias: $325\#$ igual a $44\ \mu\text{m}$, $100\#$ igual a $149\ \mu\text{m}$ (Lambe & Whitman, 2004). Por lo tanto, en las muestras con porcentajes más elevados de $325\#$, indica que poseen tamaños de grano más finos, ya que son capaces de atravesar un tamiz con valor apertura menor, en comparación al $100\#$, que indica un tamaño de apertura mayor que $325\#$; lo que tiene concordancia con los datos de tamaños de grano de arena, limo, arcilla obtenidos para cada muestra.



Las muestras contienen partículas de distintos tamaños de granos, dependiendo del diámetro de la partícula, se denomina arena al grano cuyo diámetro está entre 2 y 0,063 mm, le sigue el tamaño limo con un diámetro entre 0,063 y 0,004 mm; finalmente los granos menores a 0,004 mm se denominan arcilla (Nichols, 2009). Con los valores de porcentajes de arena, limo y arcilla, es posible clasificar las nueve muestras con el Triángulo de Clasificación de Suelos de la USDA (USDA, 2014) (Figura 4.2), ya que al tratarse de material no consolidado, no es posible utilizar clasificaciones de rocas sedimentarias. En el triángulo de clasificación, las muestras se ubican cercanas al vértice de limo, por lo que tienen una predominancia en ese tamaño de partícula. De las nueve muestras, cuatro se ubican en la arista derecha del triángulo, lo que se traduce en la ausencia del tamaño de grano arena en aquellas muestras. Se obtienen cinco muestras en la clasificación franco limosa, siendo un suelo mayoritariamente limo, con partes menores de arcilla y arena. También se obtienen dos muestras clasificadas como franco arcillo limosa, donde destaca la ausencia de arena, y dos muestras clasificadas como franco arenosa, que son las muestras con mayor cantidad de arena (52,7% y 53,8%; respectivamente), pero con la menor cantidad de limo. Todas las muestras tienen el denominador común de ser suelos francos, cuyo significado radica en ser suelos con una estructura y porcentaje de componentes favorables para la actividad agrícola (USDA, 1999).

4.4. Análisis por Difracción de Rayos X

El estudio mediante difracción de rayos X (DRX) se realiza para caracterizar la mineralogía de las muestras, tanto en su contenido en muestra total, como también en la fracción argílica (0,45 - 2 μm); con el objetivo de diferenciar la mineralogía e identificar las fases cristalinas presentes. Las muestras fueron montadas en un portamuestras y analizadas mediante el equipo Bruker D4 Endeavor, utilizando radiación de Cu y filtro de radiación $K\beta$ de Ni. Para la fracción argílica, se debe realizar un procedimiento adicional, que consiste en escanear la muestra cuatro veces en diferentes condiciones; en primer lugar, la sección con orientación preferencial de la cara 001, luego saturada en etilenglicol, seguido de un tratamiento térmico a 375 $^{\circ}\text{C}$ y finalmente con un segundo tratamiento térmico a 550 $^{\circ}\text{C}$; lo que permitirá diferenciar las distintas familias de filossilicatos presentes. La interpretación de los datos obtenidos, la identificación de las fases cristalinas y la confección de los difractogramas se realiza mediante el software DIFFRAC.EVA de Bruker. Los difractogramas generados son gráficos cuya abscisa *d- $Scale$* corresponde a la distancia (*d*) entre los planos de la red cristalina, medidos en ángstrom (\AA), cuya equivalencia es $1 \text{\AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,0001 \mu\text{m}$; la ordenada, en cambio, es la intensidad de los minerales en cuentas por segundo (cps). Los difractogramas generados para las nueve muestras se encuentran en el Anexo IV: Análisis por Difracción de Rayos X.

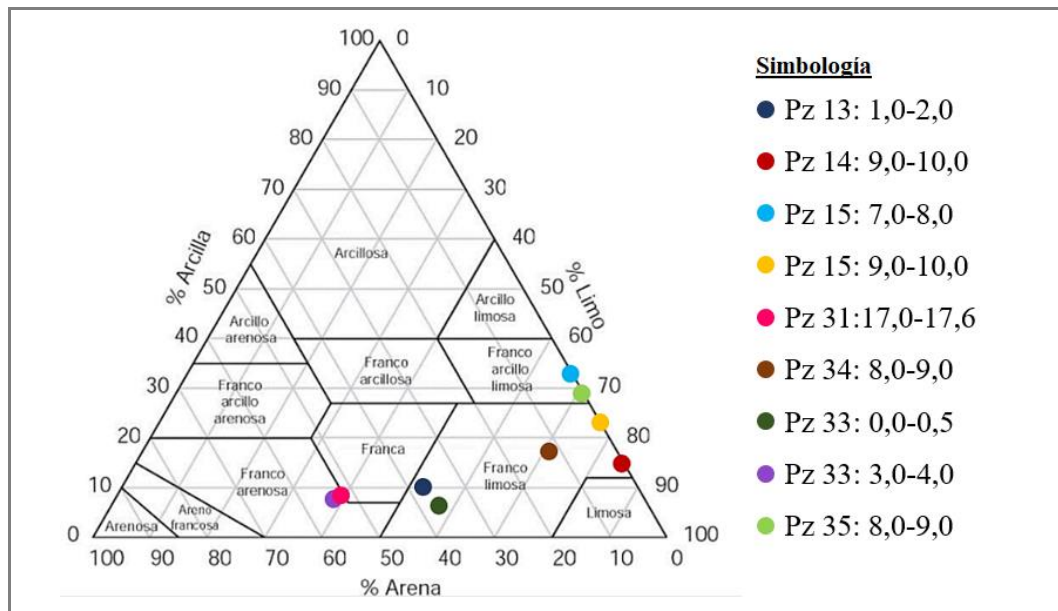


Figura 4.2: Triángulo de clasificación de suelos. Modificado de USDA (1987).

4.4.1. Análisis en muestra total

Se confecciona una tabla resumen con las fases minerales presentes en muestra total (Tabla 4.5), observadas en las nueve muestras mediante difracción de rayos X.

Tabla 4.5: Fases minerales en muestra total mediante DRX.

Muestra	Fases Minerales
Pz 13: 1,0-2,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Yeso, Fayalita, Ortoclasa, Piroxeno, Clinocloro, Magnetita, Pirita.
Pz 14: 9,0-10,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Fayalita, Ortoclasa, Yeso, Andradita, Clinocloro, Magnetita, Pirita, Anfíbol.
Pz 15: 7,0-8,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Ortoclasa, Clinocloro, Biotita, Dolomita, Hematita, Magnetita.
Pz 15: 9,0-10,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Yeso, Grosularia Férrica, Clinocloro, Pirita.
Pz 31: 17,0-17,6	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Yeso, Grosularia Férrica, Hematita, Ortoclasa, Clinocloro.
Pz 33: 0,0-0,5	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Ortoclasa, Clinocloro, Biotita, Hematita, Magnetita, Yeso, Pirita.
Pz 33: 3,0-4,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Ortoclasa, Clinocloro, Magnetita, Yeso, Pirita, Calcopirita.
Pz 34: 8,0-9,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Ortoclasa, Clinocloro, Magnetita, Yeso, Pirita, Calcopirita, Enstatita, Grosularia Férrica, Forsterita.
Pz 35: 8,0-9,0	Cuarzo, Plagioclasa (albita), Calcita, Grosularia Férrica, Hematita, Ortoclasa, Clinocloro, Fayalita, Magnetita.

De las fases cristalinas obtenidas del análisis de difracción, se puede apreciar una mineralogía base predominante, compuesta de cuarzo, plagioclasa y ortoclasa. El cuarzo es predominante en gran parte de las muestras, siendo incluso observable de forma macroscópica. En los difractogramas el cuarzo es fácilmente distinguible a los $3,14 \text{ \AA}$ (en la escala d), cuyo valor es estándar para el cuarzo y sirve de referencia en el gráfico. La plagioclasa presente corresponde a albita, que se trata de un aluminosilicatos de sodio, siendo en la serie isomorfa, la plagioclasa con mayor contenido de sodio en su composición ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). La mineralogía base descrita está presente en todas las muestras, lo que es esperable ya que son minerales formadores de roca y corresponderían a una fase primaria dominante dentro de la mineralogía del tranque, salvo el caso de la ortoclasa, que su presencia es menor en comparación al cuarzo y plagioclasa, por que correspondería a una fase primaria menor.

Por otra parte, destaca la presencia de calcita en todas las muestras con diversas intensidades, dependiendo de las otras fases minerales presentes. En la Figura 4.3 se puede observar el difractograma de la muestra Pz 35: 8,0-9,0, donde distingue la mineralogía base de cuarzo (■), albita (▲) y ortoclasa (▢). pero la calcita (◆) presenta una gran intensidad, destacando por sobre los minerales primarios. La calcita como fase dominante solo está presente en dos muestras, Pz 15: 7,0-8,0 y Pz 35: 8,0-9,0; y coinciden en ser las dos únicas muestras donde no se observó yeso dentro de las fases minerales presentes.

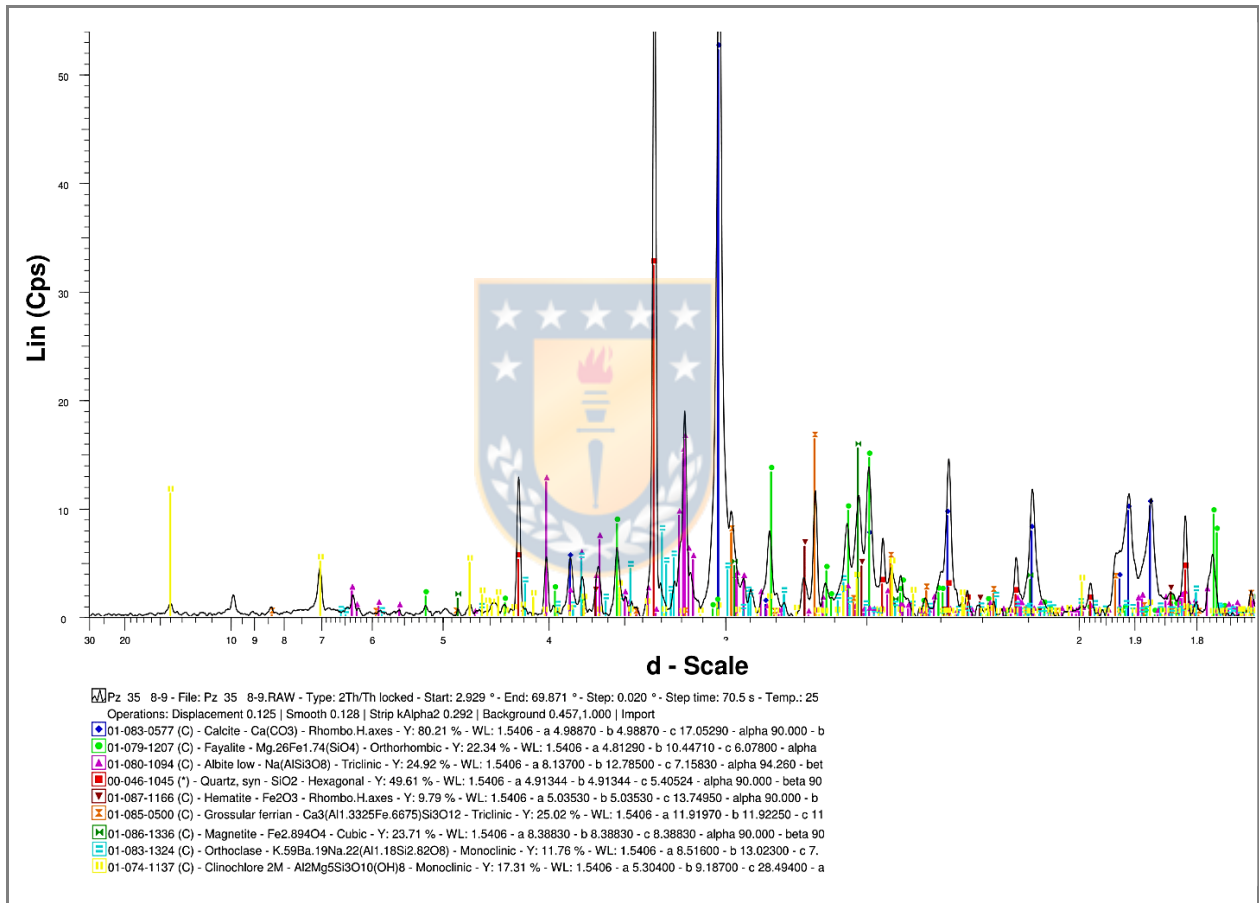


Figura. 4.3: Difractograma de la muestra Pz 35: 8,0-9,0. *d-Scale* corresponde a la distancia (d) entre los planos de la red cristalina, referente a la Ley de Bragg; y la intensidad de los minerales se mide en cuentas por segundo (cps). Se reconoce calcita, fayalita, albita, cuarzo, hematita, grosularia, magnetita, ortoclasa y clinocloro.

En algunas muestras también se distinguen fases presentes de olivinos y granates. Los granates se observaron en cinco de las muestras, en Pz 14: 9,0-10,0 se observó andradita, que corresponde a un granate rico en hierro y calcio ($\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_3$), mientras que en las muestras Pz 15: 9,0-10,0; Pz 31: 17,0-17,6; Pz 34: 8,0-9,0 y Pz 35: 8,0-9,0; se reconoce grosularia férrica, que corresponde

a un granate de calcio y aluminio ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), pero al ser férrico, presentaría cationes divalente Fe^{2+} o trivalentes Fe^{3+} en reemplazo del calcio o aluminio, siendo una grosularia rica en hierro. En la Figura 4.4 se pueden observar los difractogramas de las muestras Pz 15: 9,0-10,0 y Pz 14: 9,0-10,0 en donde se aprecia la presencia de granate como fase dominante, exhibiendo la intensidad más alta en comparación a las fases minerales adyacentes, siendo las únicas dos muestras con esa dominancia mineralógica. La muestra Pz 15: 9,0-10,0 presenta grosularia férrica como fase dominante, mientras que la muestra Pz 14: 9,0-10,0 presenta andradita como fase mineral dominante. En las tres muestras restantes el granate se encuentra como fase menor. El olivino está presente en cuatro muestras como fase cristalina menor; en tres de las muestras el olivino corresponde a fayalita, un olivino férrico ($(\text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$), mientras que en la muestra Pz 34: 8,0-9,0 se observa forsterita, que corresponde a un olivino magnésico (Mg_2SiO_4), y coincide en aparición junto a otro silicato de magnesio presente en la muestra, la enstatita, que es un piroxeno de magnesio (MgSiO_3). La muestra Pz 34: 8,0-9,0 es la única donde se observaron silicatos de magnesio. En la Figura 4.4 se puede observar en ambas muestras, en la demarcación en amarillo, una desviación de la línea base, que corresponden a material amorfo detectado en el análisis, posiblemente escorias provenientes de la mezcla de material con el Tranque N°1.

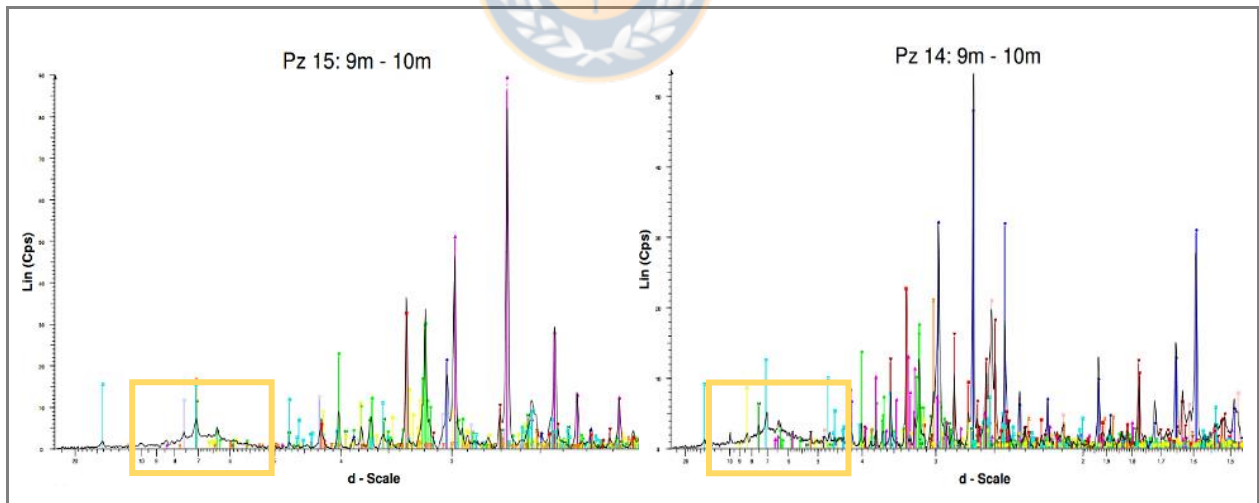


Figura 4.4: Difractogramas de las muestras Pz 15: 9,0-10,0 y Pz 14: 9,0-10,0. En la parte izquierda se encuentra el difractograma de la muestra Pz 15: 9,0-10,0 y en la parte derecha la muestra Pz 14: 9,0-10,0. Se observa la presencia dominante de granates, grosularia férrica (◻) a la izquierda y andradita (◼) a la derecha, presentando los *peaks* más altos de intensidad. En amarillo las zonas con material amorfo.

El anfíbol está presente como fase cristalina menor en la muestra Pz 14: 9,0-10,0; coincidiendo con la aparición de las fases de olivino y granate. Por otra parte, la fase de piroxeno se observa en la muestra Pz 13: 1,0-2,0 también como una fase cristalina menor. Respecto a los filosilicatos presentes en análisis de muestra total, la biotita se observa como fase menor en las muestras Pz 33: 0,0-0,5 y Pz 15: 7,0-8,0; siendo biotitas ricas en titanio; por otra parte, en todas los difractogramas se distingue clorita, en su variedad clinocloro, que corresponde a un aluminosilicato de magnesio, hierro y aluminio. El clinocloro se exhibe con intensidades medias, siendo una fase mineral presente en todas las muestras.

Por último, se reconocieron fases de minerales metálicos en todas las muestras, cuyas intensidades denotan fases menores o trazas. Principalmente son metales ricos en hierro, como la magnetita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$) y la hematita (Fe_2O_3), ambos óxidos de hierro, presentes en siete y cuatro muestras, respectivamente, ambos minerales en fases menores. Dentro de los sulfuros de hierro, se encuentra la pirita (FeS_2), observada en seis muestras como fase menor o traza. En la muestra Pz 33: 3,0-4,0; destaca la ocurrencia de calcopirita (CuFeS_2), el único sulfuro de hierro y cobre observado en los difractogramas y presente como fase mineral traza.

4.4.2. Análisis en fracción argílica (0,45 - 2 μm)

Debido a su menor tamaño, la fracción argílica debe ser sometida a una preparación especial para poder analizarla. Se obtienen cuatro lecturas bajo distintas condiciones, lo que ayudará a la identificación de los minerales. En primer lugar, se realiza una medición para la sección orientada (OR), seguido de la adición de etilenglicol (EG), para luego someter la muestra a 375 °C y finalmente 550 °C; con lo anterior se obtienen distintas lecturas bajo orientación, expansión y calor, evidenciando el comportamiento de las arcillas y la capacidad de retención.

Pese a que el análisis de fracción argílica en secciones orientadas no es concluyente para identificar minerales que no sean filosilicatos, en todas las muestras se distingue el cuarzo y la albita, observándose *peaks* muy distinguibles debido a su gran abundancia, el principal es el cuarzo con un $d \sim 3,34 \text{ \AA}$, marcándose como guía para facilitar la identificación. La albita se identifica generalmente con un valor $d \sim 3,19 \text{ \AA}$, pero siempre en menor intensidad que el cuarzo. La calcita

también destaca con intensidades elevadas, pero principalmente en las muestras Pz 35: 8,0-9,0 y Pz 15: 7,0-8,0; donde se observa un *peak* de intensidad mayor al cuarzo y de los otros minerales, con un valor $d \sim 3,03 \text{ \AA}$ esperable en los difractogramas, ya que en análisis de muestra total se presenta como fase dominante en las mismas muestras. Dentro de los minerales no arcillosos, destaca en la muestra Pz 14: 9,0-10,0 la presencia de andradita que se puede observar en la Figura 4.5; lo que se correlaciona con lo observado anteriormente en análisis de muestra total, donde el granate es la fase mineral dominante.

Los filosilicatos identificados son clinocloro, illita, caolinita, esmectita y corrensita. El filosilicato que presenta intensidades más altas es el clinocloro, perteneciente al grupo de la clorita, corresponde a un aluminosilicato de magnesio, hierro y aluminio. Presenta un valor d aproximado de $3,55 \text{ \AA}$; $4,72 \text{ \AA}$; $7,09 \text{ \AA}$ y $14,16 \text{ \AA}$; destacando en la muestra Pz 34: 8,0-9,0 con las dos mayores intensidades en $\sim 3,55 \text{ \AA}$ y $\sim 4,73 \text{ \AA}$.

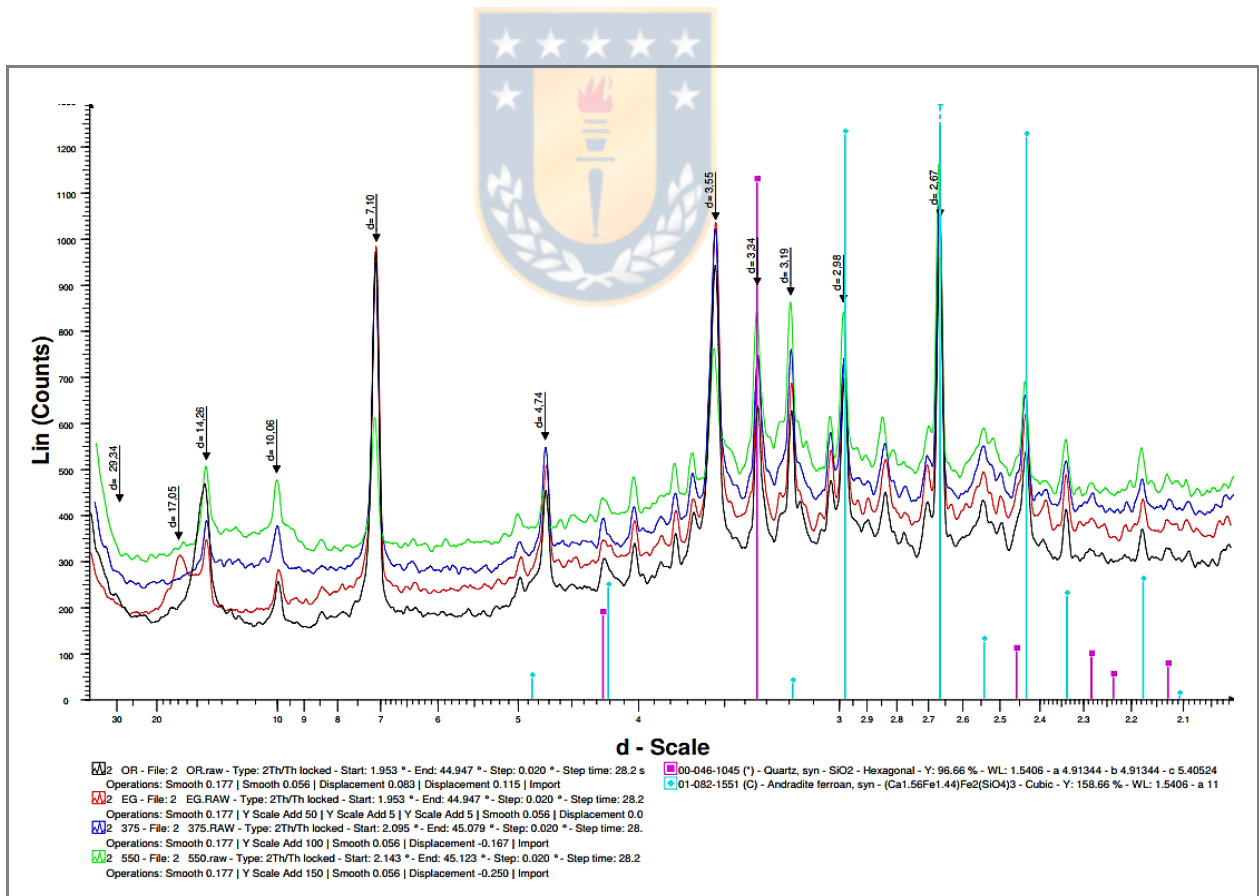


Figura 4.5:

Difractograma para fracción argílica en muestra Pz 14: 9,0-10,0. Se observa la presencia dominante de andradita en color calipso (◻) presentando el *peak* más alto de intensidad.

La illita corresponde a una arcilla del grupo de las micas y se presenta con abundancia en las muestras; debido a su estructura, al ser un filosilicato laminar, es posible distinguirlo en un $d \sim 5 \text{ \AA}$ ($n=2$) y además en $d \sim 10 \text{ \AA}$ ($n=1$). En las cuatro condiciones analizadas se comportan con una intensidad similar, por lo que bajo etilenglicol no se expande, demostrando su capacidad de arcilla no expansiva (Poppe *et al.*, 2001).

La caolinita es una arcilla de composición $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, con un bajo grado de expansión/contracción. Se identifica fácilmente ya que comparte $d \sim 3,55 \text{ \AA}$ y $d \sim 7,09 \text{ \AA}$ con el clinocloro, acoplándose a la señal en condiciones orientadas (OR), con etilenglicol (EG) y a $375 \text{ }^\circ\text{C}$; pero a los $550 \text{ }^\circ\text{C}$ la intensidad decae drásticamente ya que solo corresponde a la lectura de clinocloro; debido a que el caolín no es una arcilla termoestable y su estructura cambia al calcinarse a $550 \text{ }^\circ\text{C}$, convirtiéndose en metacaolín (Restrepo *et al.*, 2006).

Las arcillas del grupo de la esmectita se encuentran presentes con baja intensidad en todas las muestras. En este grupo se encuentra la montmorillonita, la saponita, entre otras y corresponden a arcillas expansibles (Borchardt, 1977), por lo que son identificables en los difractogramas bajo condiciones de expansión con etilenglicol (EG). Presentan un valor d entre $14,4\text{-}15,6 \text{ \AA}$; e hidratadas hasta un $d \sim 17 \text{ \AA}$, observándose este último en las muestras.

La corrensita es una arcilla y corresponde a una interstratificación regular 1:1 de clorita-esmectita o clorita-vermiculita. La interstratificación clorita-esmectita, se denomina corrensita HLC (del inglés, *high layer charge*), a diferencia de la interstratificación de clorita-vermiculita, que se denomina corrensita LLC (del inglés, *low layer charge*) (Bailey, 1982). El valor d basal suele ser $\sim 29 \text{ \AA}$, pero en el caso de la corrensita HLC, el espaciado basal puede llegar hasta $\sim 32 \text{ \AA}$ debido a su propiedad expansiva, mientras que la corrensita LLC no se expande. La clorita está muy presente en todas las muestras analizadas y la esmectita está presente en menor intensidad, mientras que la vermiculita no fue observada. La corrensita es posible observarla en cinco muestras, a una baja intensidad, en condiciones de expansión con etilenglicol (EG); por lo que correspondería a corrensita HLC debido a que previamente solo se identificaron fases individuales de esmectita y clorita y la interstratificación está expandida con el etilenglicol por presentar valores d mayores a

29 Å. En la Figura 4.6 se puede observar la presencia de corrensitita en la muestra Pz 31: 17,0-17,6 en el gráfico negro (OR) y el gráfico rojo (EG), entre los 29 Å y 32 Å.

4.5. Análisis por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X

El análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica de espectrometría atómica, fundamentada en la detección de radiación X emitida por átomos excitados, en donde la fluorescencia de los fotones es característica de cada elemento en particular, y su intensidad determina su concentración respectiva. El análisis entrega información elemental del material, de tal forma que se complementa la información mineralógica obtenida por difracción de rayos X (DRX), proporcionando datos cuantitativos de elementos mayores, menores y trazas.

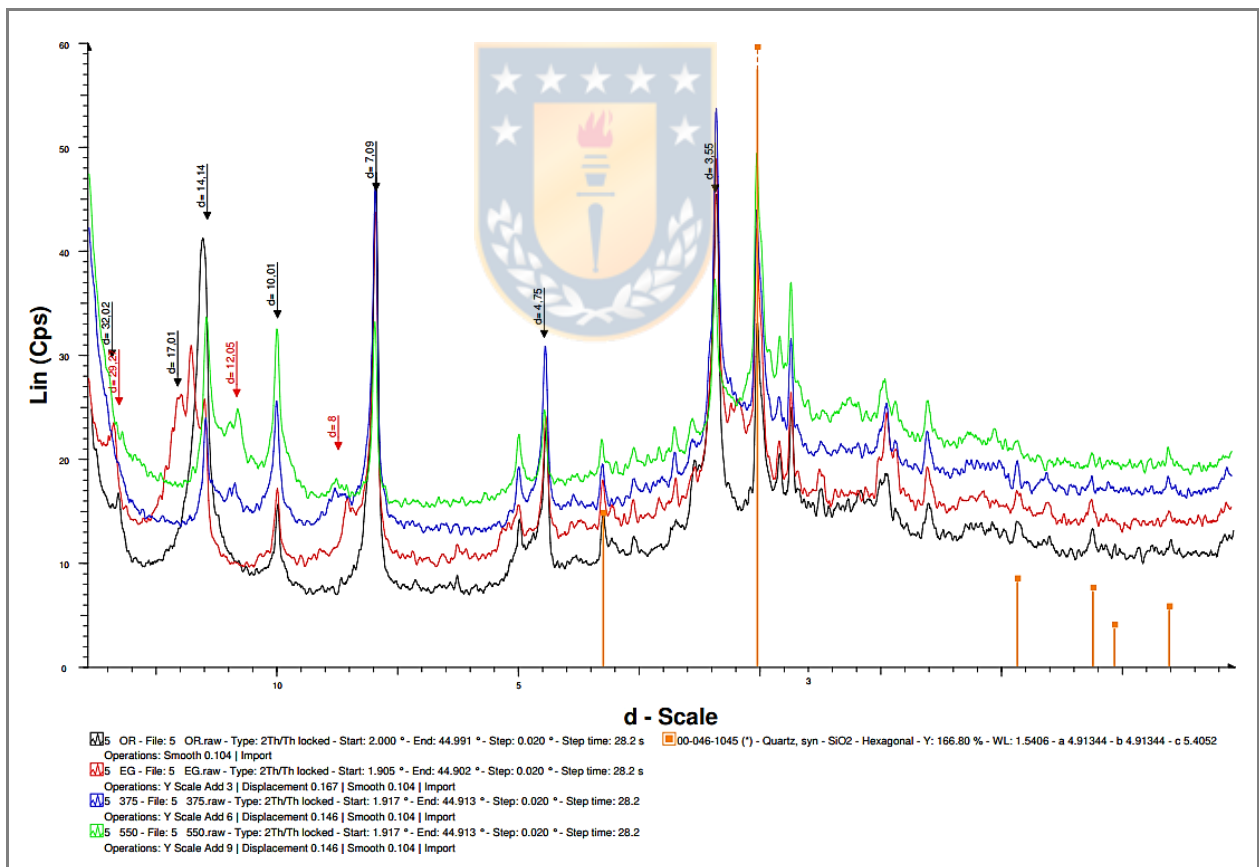


Figura 4.6: Difractograma para fracción argílica en muestra Pz 31: 17,0-17,6. Se observa la presencia de corrensitita entre los 29 Å y 32 Å, tanto en muestra orientada (gráfico negro) como también en muestra con etilenglicol (gráfico en rojo). En naranja se observa el cuarzo, que sirve como referencia a los 3,34 Å.

El estudio por fluorescencia de rayos X en muestra total, fue realizado con el equipo Rigaku ZSX Primus II (WDS), operado con radiación de rodio (Rh) sin estandarización, en donde el material a estudio fue preparado previamente, pasando por un proceso de pulverización para poder generar una pastilla prensada, la que es sometida a estudio. Los resultados de los componentes analizados están expresados como compuestos óxidos, salvo en el caso del F y Cl, cuyos resultados son del componente elemental. Al tratarse de una matriz silicatada en estudio, se mantienen los resultados como óxidos para evitar una sobreestimación de los elementos menores y trazas. Los elementos mayores corresponden a los que presentan una concentración $>1\%$ en peso de masa. Por otra parte, los elementos menores presentan una concentración $<1\%$ en peso y elementos trazas $<0,1\%$ en masa; en ambos casos se recalcularon a ppm para una mejor visualización. El detalle del análisis realizado a cada muestra se encuentra en el Anexo V: Análisis por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.

Los elementos mayores analizados corresponden a los siguientes óxidos: Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O , SiO_2 y SO_3 ; mientras que los elementos menores y trazas corresponden a: F, As_2O_3 , BaO , CdO , Cl, CO_2O_3 , Cr_2O_3 , CuO , MnO , MoO_3 , NiO , P_2O_5 , PbO , Rb_2O , Sb_2O_3 , SrO , TiO_2 , V_2O_5 , WO_3 , Y_2O_3 , ZnO , ZrO_2 .

En la Tabla 4.6 se expresan los valores obtenidos para los elementos mayores, cuyas concentraciones corresponden a óxidos. Estos elementos poseen un porcentaje de concentración mayor a 1% en masa. Se distingue la predominancia de SiO_2 , presentando concentraciones mayores al 30% en masa, promediando en las 9 muestras estudiadas un valor de $44,10\%$, con el valor más alto de SiO_2 , en la muestra Pz 31: $17,0-17,6$; de $54,80\%$ de concentración. La predominancia de SiO_2 es coherente con las fases cristalinas dominantes, observadas anteriormente mediante DRX, y caracterizadas principalmente por la abundancia de silicatos. Luego del SiO_2 , los elementos mayores sobre el 10% de concentración promedio son Al_2O_3 , CaO y Fe_2O_3 . La presencia de Al_2O_3 guarda relación a la presencia de fases minerales de aluminosilicatos como la albita, y filosilicatos del grupo de la mica y arcillas, observados anteriormente en DRX. Finalmente, presentando concentraciones menores al 10% en masa, se encuentran SO_3 , MgO , Na_2O y K_2O .

Tabla 4.6: Concentraciones de elementos mayores. Elementos mayores expresados como óxidos. Valores obtenidos corresponden a porcentaje en masa.

Elementos Mayores (% masa)	Pz 13: 1,0-2,0	Pz 14: 9,0-10,0	Pz 15: 7,0-8,0	Pz 15: 9,0-10,0	Pz 31: 17,0-17,6	Pz 33: 0,0-0,5	Pz 33: 3,0-4,0	Pz 34: 8,0-9,0	Pz 35: 8,0-9,0	Promedio (\bar{x})
Al ₂ O ₃	7,76	9,80	9,14	12,00	14,30	9,09	10,30	13,30	9,15	10,54
CaO	11,30	14,90	35,00	19,30	3,83	9,96	8,73	4,86	25,00	14,76
Fe ₂ O ₃	15,90	27,80	11,00	17,10	11,40	18,40	9,06	20,90	19,10	16,74
K ₂ O	1,94	0,93	1,67	0,81	3,42	2,01	2,23	1,37	1,56	1,77
MgO	1,43	3,20	2,34	3,74	3,52	2,31	2,43	3,25	2,13	2,71
Na ₂ O	1,78	1,51	1,60	2,64	2,89	1,87	2,41	3,96	1,64	2,26
SiO ₂	51,70	35,30	35,10	38,60	54,80	44,80	53,00	47,30	36,30	44,10
SO ₃	2,67	2,97	1,32	3,00	3,37	6,26	4,09	2,08	1,52	3,03

Considerando los promedios obtenidos en cada muestra, los elementos mayores representan un 95,91% de total en masa, mientras que el porcentaje restante corresponde a 22 elementos menores y trazas, los que se exponen en la Tabla 4.7; expresados en partes por millón (ppm).

Los elementos menores, en su mayoría, presentan una concentración menor a 1% en masa, salvo CuO y P₂O₅, que en algunas muestras presentan concentraciones mayores al 1%. El cobre (expresado como CuO) es el elemento menor con la concentración más alta, promediando en todas las muestras 12580 ppm; en donde destaca el valor más alto, que corresponde a 41100 ppm (4,11% en masa) de Cu en la muestra Pz 33: 3,0-4,0; en DRX se observó la presencia calcopirita dentro de las fases minerales presentes en la muestra, siendo un disulfuro de cobre y hierro, y mena de cobre más importante, lo que podría explicar la alta concentración de Cu en aquella muestra. El fósforo (expresado como P₂O₅), por su parte, se encuentra presente en todas las muestras promediando 11839 ppm, siendo el segundo promedio de concentración más alto después del cobre; y sobresaliendo por sobre los 10000 ppm (1% de concentración en masa) en tres de las muestras: Pz 33: 0,0-0,5; Pz 33: 3,0- 4,0 y Pz 13: 1,0-2,0. Además del CuO y P₂O₅, por sobre los 1000 ppm promedio, se encuentran también el MnO con 4173 ppm, ZnO con 2220 ppm y TiO₂ con 5146 ppm; los tres elementos tienen presencia en todas las muestras, resaltando el TiO₂, que exhibe concentraciones por sobre los 2000 ppm y el MnO, con 6118,55 ppm en la muestra Pz 14: 9,0-10,0 y 8519,50 ppm en la muestra Pz 15: 9,0-10,0.

Tabla 4.7: Concentraciones de elementos menores y trazas. Valores obtenidos corresponden a partes por millón (ppm).

Elemento (ppm)	Pz 13: 1,0-2,0	Pz 14: 9,0-10,0	Pz 15: 7,0-8,0	Pz 15: 9,0-10,0	Pz 31: 17,0-17,6	Pz 33: 0,0-0,5	Pz 33: 3,0-4,0	Pz 34: 8,0-9,0	Pz 35: 8,0-9,0	Promedio (\bar{x})
F	1980	0	765	0	0	1910	2290	0	0	772
As₂O₃	699	721	263	279	0	789	495	441	437	458
BaO	900	825	832	0	517	558	654	949	1920	795
CdO	506	0	0	0	0	0	0	0	0	56
Cl	283	280	200	351	218	688	187	168	165	282
Co₂O₃	173	307	143	196	153	147	113	202	166	178
Cr₂O₃	652	790	0	0	0	104	86	839	574	338
CuO	13800	5930	6830	3950	4560	19600	41100	8930	8520	12580
MnO	2430	7900	3830	11000	1440	2530	1730	2430	4270	4173
MoO₃	404	3820	114	96	0	33	74	386	547	608
NiO	64	87	73	62	0	52	52	59	72	58
P₂O₅	24000	4960	8700	5740	9270	20600	23200	3140	6940	11839
PbO	0	433	1330	246	329	315	308	475	1640	564
Rb₂O	53	31	67	24	113	58	65	50	64	58
Sb₂O₃	185	0	0	0	0	386	0	458	0	114
SrO	188	199	289	109	136	129	147	195	265	184
TiO₂	3800	4960	4630	5520	6970	3950	5530	5620	5330	5146
V₂O₅	225	236	721	395	525	393	365	392	581	426
WO₃	886	274	0	220	512	378	362	378	333	371
Y₂O₃	24	0	0	17	19	26	16	24	0	14
ZnO	4090	4210	414	967	138	708	535	4430	4490	2220
ZrO₂	99	144	137	128	134	94	128	123	129	124

El cadmio (expresado como CdO) se encuentra solo en la muestra Pz 13: 1,0-2,0; con una concentración de 506 ppm. El antimonio (expresado como Sb₂O₃) está presente por sobre los 100 ppm solo en tres muestras: Pz 13: 1,0-2,0; Pz 33: 0,0-0,5 y Pz 34: 8,0-9,0; con un promedio de concentración de 114 ppm. El flúor (F) se encuentra presente en cuatro muestras, con un promedio de concentración de 771 ppm, pero resaltan los valores en Pz 13: 1,0-2,0; Pz 33: 0,0-0,5 y Pz 33: 3,0-4,0; cercanos a los 2000 ppm aproximadamente, lo que correspondería a un 0,2% de concentración en masa de cada una de esas tres muestras. El molibdeno (expresado como MoO₃) está presente en todas las muestras, salvo en Pz 31: 17,0-17,6; y resalta en la muestra Pz 14: 9,0-10,0 con una concentración de 3820 ppm.

En torno a los elementos trazas identificados (expresado como óxidos), níquel (NiO), rubidio (Rb_2O), itrio (Y_2O_3) y circonio (ZrO_2) son los únicos que expresan promedios cercanos o menores a 100 ppm de concentración, sin considerar al Cd y Sb, donde sus valores aislados en cada muestra, donde están presentes, son por sobre los 100 ppm. NiO, al igual que MoO_3 , está presente en todas las muestras, salvo en Pz 31: 17,0-17,6. Rb_2O y ZrO_2 están en todas las muestras con valores traza de concentración. Pese a que figura identificado el elemento Itrio (Y_2O_3), las tierras raras no se pueden detectar de forma correcta mediante análisis FRX, debido a la superposición de la radiación del rodio (Rh) que se utiliza en el equipo para el análisis de la información elemental del material en estudio.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Planta La Cocinera, y en especial sus relaves, presentan una extensa cronología de aportes, procesamiento y diversa actividad a lo largo de los años, por lo que se es necesario incorporar la historia del relave y su contexto minero, a la información obtenida en laboratorio, para poder entender y caracterizar de mejor forma los resultados.

5.1. Historia

El yacimiento de Panulcillo, está clasificado como un depósito de skarn cuprífero, como parte de la franja metalogénica del Cretácico inferior (Maksaev, 2001), formado por metamorfismo de contacto en rocas sedimentarias carbonatadas de la Formación Arqueros. El yacimiento consistiría en una secuencia estratigráfica, que se inicia, de base a techo, con una intercalación de rocas volcánicas andesíticas con tobas piroclásticas, seguido de una unidad metasedimentaria de calizas, mármoles, anfibolitas y skarn; terminando con una unidad volcánica andesítica intercaladas con lutitas. Las facies metamórficas de la unidad metasedimentaria serían resultado de un metamorfismo de contacto causado por un plutón (intrusivo Pejerreyes) sobre la segunda unidad, y sería similar en la generación de las anfibolitas presentes (Araya *et al.*, 1998 en Castellón, 2017) Otros autores han descrito que las rocas volcánicas andesíticas han sido recristalizadas en hornfels de grano fino, como también, que se produjo un skarn entre las rocas andesíticas y las rocas carbonatadas, a lo largo de la zona de contacto (Rio Tinto Group, 2001 en Castellón, 2017), por lo que no se le podría atribuir la formación de skarn exclusivamente al plutón Pejerreyes. Respecto a la mineralización del yacimiento, se han descrito dos estilos: el primero sería un metamorfismo prógrado, que habría mineralizado con pirita, calcopirita y magnetita, como recristalizaciones en el skarn; y un metamorfismo retrógrado hidrotermal, que junto a fluidos varios generando alteraciones silíceas, biotítica, clorítica y cuarzo-sericítica; lo anterior, en conjunto con una removilización de minerales metálicos preexistentes, generando calcopirita y bornita, aumentó la concentración de Cu en los cuerpos rocosos (Araya *et al.*, 1998 en Castellón, 2017). Rio Tinto Group (2001 en Castellón, 2017) también describe una mineralización en dos etapas, similar a los descritos anteriormente, y agregando que los dos tipos de ocurrencia de Cu generan cuerpos

mantiformes, el primero desarrollado en el skarn (explotado en los rajos Caracoles, Mina Nueva y Rosario) y el que encuentra en las rocas silicificadas o con alteración potásica.

En términos generales, un depósito skarn presenta dos zonas, la parte del skarn que perteneció a la roca intrusiva se llama endoskarn, mientras, que la parte que perteneció a la roca de caja se denomina exoskarn; la mineralización puede afectar ambas partes, pero en el exoskarn es más recurrente. Sugaki *et al.* (2000) describen la mineralización en el exoskarn y el origen del yacimiento a partir de la intrusión de un cuerpo cretácico de composición diorítica en una secuencia volcano-sedimentaria del cretácico inferior, presentando una zona de exoskarn caracterizada por una asociación de minerales ricos en Mg y Al, correspondiendo a un skarn de granate de tipo ugrandita y cantidades menores de flogopita, diópsido, clintonita, hornblenda, actinolita, clorita, cuarzo y calcita. La ugrandita es una serie isomorfa que puede contemplar tres granates: uvarovita, andradita y grosularia. La composición rica en Mg-Al del skarn puede deberse a un componente dolomítico en la roca caja. Por otra parte, los minerales metálicos corresponderían principalmente a calcopirita, pirrotina, esfalerita, pirita y magnetita. Otros metales como galena, hematita y covelina secundaria se encontrarían en menor cantidad, rellenando intersticios del skarn. Sugaki *et al.* (2000) describen tres etapas cronológicas para la mineralización paragenética: en primer lugar, se lleva a cabo un metamorfismo prógrado que genera granate y piroxeno. La segunda etapa corresponde a una mineralización de skarn, con anfíboles (hornblenda y actinolita) y micas, que se encuentran en paragénesis con magnetita, pirita, pirrotina, calcopirita, esfalerita y galena. La tercera y última etapa, se trataría de una alteración supérgena, con minerales como clorita, calcita, cuarzo y hematita. La mineralización de cobre habría ocurrido en un ambiente de baja sulfuración, lo que es recurrente en depósitos de skarn cupríferos asociados a rocas estériles (Sugaki *et al.*, 2000).

Estudios posteriores han reclasificado el yacimiento de Panulcillo como un depósito IOCG, cuyo término corresponde a una sigla del inglés *iron oxide copper-gold*, y se caracterizan por una mineralización de óxidos de Fe, con cantidades variables de Cu, Au, P, Co, REE, entre otros (Groves *et al.*, 2010). En Chile se relaciona a un grupo diverso de yacimientos de origen magmático - hidrotermal, con ganga de óxidos de hierro (magnetita y hematita), asociados a rocas de edad Cretácico inferior en la cordillera de la Costa; algunos de los yacimientos IOCG que se

encuentran en Chile son: Candelaria, Manto Verde, Casualidad, Santo Domingo y Diego de Almagro (Villela & Cantallopts, 2016).

Díaz & Corvalán (2015) propusieron un modelo genético de Panulcillo, clasificándolo como un yacimiento IOCG por su mineralogía de mena, ganga y asociaciones de alteración; describiendo una génesis asociada a un magma del tipo Fe-P, que se separó por inmiscibilidad desde su fuente magmática. Lo anterior, bajo condiciones estructurales asociadas al sistema de fallas Romeral, y a su vez, asociadas a las trazas de milonitas presentes en la falla Panulcillo. Los autores además proponen que la fase silicatada tendría relación con el plutón Pejerreyes y su intrusión en rocas sedimentarias y volcánicas de la Formación Arqueros, generando metamorfismo de contacto. La mineralización cuprífera habría sido generada por fluidos hidrotermales relacionados al magma Fe - P, que ascendieron a través de la falla Panulcillo, bajo un régimen tectónico concordante con un sistema pull apart sinistral ligado a dicha falla (Díaz & Corvalán, 2015).

Castellón (2017), tras un estudio geoquímico y estructural del yacimiento, también describe a Panulcillo como un yacimiento IOCG, pero con un skarn asociado, en donde la mineralización proviene de diques microdioríticos que generaron skarn en las rocas calcáreas de la secuencia estratigráfica, la que también se encuentra mineralizada. Los diques microdioríticos mineralizados no tendrían relación con el plutón Pejerreyes, ya que corta la secuencia estratigráfica y la mineralización. El yacimiento se encontraría modificado por la acción estructural, principalmente por la falla Panulcillo, facilitando la formación de fallas subsidiarias, la intrusión de diques mineralizados y la formación de vetas de calcopirita-pirita, calcopirita-magnetita-pirita y vetas de calcopirita-bornita. Castellón (2017) considera además, dos procesos mineralizadores, el primero asociado a un evento magmático relacionado a la intrusión de los diques microdioríticos mineralizadores; y un segundo evento de carácter hidrotermal, en donde se concentraron minerales de cobre debido a la circulación de fluidos, generados por el calor del plutón Pejerreyes y los diques presentes, como también por el aumento de fracturas y permeabilidad en las rocas debido a las fallas existentes en el yacimiento.

5.2. Mineralogía

La mineralogía presente en el tranque N°2 de la Planta La Cocinera, se encuentra caracterizada principalmente por cuarzo, albita, ortoclasa, olivinos (forsterita y fayalita), piroxenos, anfíboles, granates (grosularia y andradita), calcita, yeso, biotita, clinocloro y arcillas. Los sulfuros presentes son calcopirita y pirita, en tanto que los óxidos presentes son magnetita y hematita; ambos óxidos de hierro. La fracción argílica se compone por arcillas no expansivas y expansivas; del grupo de las no expansivas se encuentra illita y caolinita, mientras que las arcillas expansivas corresponden a esmectita y corrensita (interestratificación con esmectita-clorita).

Considerando las nueve muestras estudiadas, se puede establecer una fase mineralógica dominante, compuesta por cuarzo, plagioclasa, calcita y granates. Luego sigue una fase mineralógica menor, compuesta por feldespato potásico, olivinos, piroxenos, yeso, clinocloro, magnetita, hematita, pirita y micas. Finalmente una fase de minerales traza conformada por calcopirita, anfíbol y algunas arcillas, como caolinita, esmectita y corrensita.

Las fases minerales previamente descritas coinciden con una mineralogía de ganga proveniente de una fuente de skarn como la mina Panulcillo. Respecto a la fase mineralógica dominante, los altos valores de cuarzo y calcita, además de corresponder a minerales de la roca caja, también pudieron verse acrecentados tras una alteración supérgena descrita en Panulcillo, que incluye inclusiones de cuarzo en los granates y en la matriz, como también calcita en la mineralización de skarn (Sugaki *et al.*, 2000). Los granates también son ampliamente descritos en el yacimiento, siendo el mineral más abundante en la zona de skarn, por lo que Panulcillo es incluso caracterizado por Sugaki *et al.* (2000) como un skarn de granate ugrandita, describiendo un exoskarn con dos zonas, la primera zona es de minerales calcosilicatados (zona de skarn estéril) y la segunda es una zona mineralizada rica en granates con impregnaciones de sulfuros, siendo el metamorfismo prógrado el responsable de la formación de granates durante la etapa primaria del skarn. Los granates observados en las muestras del tranque corresponden a grosularia y andradita, ambos son parte de la serie isomorfa de la ugrandita, correspondiendo a silicatos cálcicos del tipo $\text{Ca}_3\text{X}_2(\text{SiO}_4)_3$, donde X se reemplaza por Al para grosularia o Fe^{3+} para andradita (Mindat, 2021).

Los feldespatos son abundantes en el tranque, ya sean plagioclasas como feldespatos potásicos (ortoclasa). Las plagioclasas presentes se encuentran caracterizadas por feldespatos sódicos, principalmente albita, que pueden asociarse a las rocas intrusivas que afectaron a Panulcillo, descritas como dioritas con plagioclasas relativo al mineral más abundante, exhibiendo incluso macla de albita bien desarrollada (Sugaki *et al.*, 2000). Por otra parte, el alto contenido de albita en el tranque, puede tener relación a los procesos de alteración posteriores en Panulcillo, como la formación de vetillas de epidota, cuarzo, calcita, clorita y albita (Castellón, 2017), como consecuencia de una alteración propilítica que genera albitización de las plagioclasas, como también una cloritización de las biotitas, lo que coincidiría con la abundancia de clinocloro y su presencia en todas en las muestras estudiadas; además de lo anterior, la clorita sería parte de un último proceso de alteración supérgeno, que generó clorita secundaria, junto a calcita, cuarzo y hematita (Sugaki *et al.*, 2000). A modo comparativo, yacimientos IOCG en Chile también han presentado alteraciones similares a lo observado en Panulcillo, como en el caso de Candelaria, cuya paragénesis se encuentra caracterizada por una alteración potásica, seguida de una alteración sodico-cálcica, que propició la formación de sulfuros de cobre y que generó actinolita, hornblenda y albita; además de una alteración de Ca-Fe-Mg evidenciada en vetas de epidota y clorita (Del Real *et al.*, 2018). El yacimiento de Candelaria exhibe además un control estructural y litológico similar a otros depósitos IOCG, pero la asociación mineralógica de alteración sericita, clorita y carbonatos, sugiere temperaturas de formación bajas en comparación a otros depósitos IOCG (Del Real *et al.*, 2018). En el yacimiento IOCG de Manto Verde ocurre una situación similar, en donde las rocas volcánicas e intrusivas fueron afectadas por una alteración potásica, generando un desarrollo de feldespato potásico y clorita; junto a un aumento de especularita (variedad de hematita), cuarzo y turmalina, y finalmente, vetillas de calcita (Maksaev, 2001).

La presencia de minerales del grupo del olivino es baja, acotada solo a la aparición de fayalita y forsterita. Por otra parte, junto a forsterita también se observó la presencia de enstatita, un ortopiroxeno magnésico, siendo los únicos silicatos magnésicos observados en las muestras. La presencia de estas fases minerales puede deberse a la mezcla de material con escorias del tranque N°1, ya que ambos tranques están adyacentes y no se encuentran estrictamente delimitados. También pueden deberse, en parte, a la ganga de intrusivos dioríticos presentes en la región, como además, de lavas porfídicas basales de la Formación Arqueros (Emparan & Pineda, 2006); ya que

en el yacimiento de Panulcillo no se han descrito ortopiroxenos u olivinos magnésicos, y únicamente se han descritos escasos clinopiroxenos (diópsido), asociados a granates en zonas relictas del skarn (Sugaki *et al.*, 2000).

Los minerales metálicos están presente en todo el tranque como fases minerales menores o trazas. Magnetita y hematita son los minerales metálicos más abundantes en el tranque, presentes como fase menor. Los sulfuros presentes se encuentran caracterizados por pirita y calcopirita, en donde el primero se encuentra en mayor concentración en el tranque en comparación a la calcopirita, siendo este último, el unico ejemplar de sulfuro de hierro y cobre, presente como fase mineral traza. En el yacimiento de Panulcillo, la magnetita ha sido observada en diversas vetillas calcopirita-pirita-magnetita, en donde la adición de magnetita se habría generado, en primera instancia, junto a una alteración potásica, siendo similar a otros modelos IOCG, y luego ocurriría la formación de otros minerales metálicos como calcopirita y pirita; la magnetita habría sido posteriormente alterada en superficie, generando hematita (Castellón, 2017). Cabe recordar que en la Planta La Cocinera, también funcionó una mina homónima, caracterizada por vetas de bornita-calcopirita, generando aportes al tranque durante su explotación (Ramírez, 2015).

La fracción argílica en el tranque está representada por clorita, illita (mica), caolinita, esmectita, talco y corrensita. La clorita, en su variedad clinocloro, es el filosilicato más abundante en el tranque y se encuentra presente en todas las muestras. La illita es el segundo filosilicato más abundante, también presente en todas las muestras estudiadas, correspondiendo a una arcilla no expansiva. La esmectita pese a observarse en todas las muestras, se encuentra en menor cantidad; y a diferencia de la illita, es una arcilla expansible (Borchardt, 1977). La caolinita se presenta como fase argílica menor; y por último, como fases argílicas traza, se encuentran el talco y la corrensita.

La ocurrencia de diversos minerales de la fracción argílica se deben a las alteraciones que afectaron al yacimiento de Panulcillo tras procesos hidotermales. La alteración propílica es descrita y reconocida al sur del yacimiento, afectando afloramiento tobáceos (Castellón, 2017), la que junto a una alteración supérgena tardía, serían las responsables de la formación de cloritización de las biotitas en Panulcillo (Sugaki *et al.*, 2000). Tras una alteración fílica de los feldespatos y a bajas temperaturas, es posible la formación illita (200-250 °C) o illita-esmectita (100-200 °C); la que

según los procesos de alteración descritos en Panulcillo, debió ocurrir junto a la mineralización del Skarn, posterior al metamorfismo progrado (Sugaki *et al.*, 2000). La generación de montmorillonita (esmectitas) y caolinita, a partir de las plagioclasas, es posible luego de una alteración argílica, formándose caolinita a temperaturas inferiores a 300 °C, generalmente en el rango de 150-200 °C, y se han descrito algunas zonas con evidencias de argilización en el yacimiento de Panulcillo, como también se ha atribuido la presencia de caolinita a un proceso de alteración supérgena (Castellón, 2017).

La presencia de corrensita, pese a que es traza, resalta en la fracción argílica ya que corresponde a la única arcilla interstratificada presente en el tranque; correspondería a una corrensita HLC, que se caracteriza por una interstratificación de clorita-esmectita, con una leve capacidad expansiva (~29 Å a ~32 Å). La corrensita se pensaba en un principio que se trataría de una etapa intermedia en el proceso en la conversión de esmectita a clorita, pero actualmente se ha establecido que se trataría de una etapa independiente, cuyas subcapas no son separables, pudiendo ser la composición química y la distribución de cargas, totalmente homogéneas en toda la estructura de la corrensita (Meunier, 2005). La corrensita no ha sido descrita en trabajos anteriores en el yacimiento de Panulcillo y solo es posible observarla mediante análisis de difracción de rayos X; pese a lo anterior, podría resultar interesante para futuros estudios del yacimiento considerar la presencia de corrensita, ya que es factible utilizarla como un mineral indicador de metamorfismo (Meunier, 2005), encontrándose en diversos entornos naturales y condiciones de formación, pero nunca ha sido observada en ambientes que no hayan sufrido procesos de alteración hidrotermal o diagenética, definiéndose como una verdadera fase mineral, similar a la clorita u otras micas; con un campo de ocurrencia a nivel de diagénesis o de metamorfismo de muy bajo grado, además de alteraciones de larga data (Meunier, 2005). En laboratorio la corrensita es posible sintetizarla con mezclas estequiométricas de óxidos a 350 °C/ 2 kbar y 500 °C/ 2kbar (Robertson *et al.* 1999 en Meunier, 2005).

La información química obtenida por fluorescencia de rayos X (FRX) es correlativa con la mineralogía presente en el tranque. Los elementos mayores se encuentran caracterizados, de mayor a menor concentración promedio, por los siguientes óxidos: SiO₂, Fe₂O₃, CaO, Al₂O₃, SO₃, MgO, Na₂O y K₂O.

En la Figura 5.1 se exhiben los elementos mayores presentes en las nueve muestras, el gráfico está normalizado al 100% para facilitar la observación, en donde destaca la predominancia del SiO_2 por sobre todos los elementos, lo que es esperable debido a la ganga silicatada depositada en el tranque, rica en cuarzo y feldespatos. El Fe_2O_3 es el segundo elemento mayor más importante, cuya concentración se debe a la presencia de minerales óxidos de hierro, como magnetita y hematita, siendo los minerales metálicos más abundantes en el tranque. La presencia de CaO destaca en la muestra Pz 15: 7,0-8,0 y Pz 35: 8,0-9,0; con un 35% y 25% de concentración, respectivamente; coincidiendo en que son las dos únicas muestras donde se observó la calcita como fase dominante mediante DRX. Las muestras Pz 34: 8,0-9,0 y Pz 31: 17,0-17,6; presentan los valores más altos de Al_2O_3 , pero a la vez los valores más bajos de CaO , debido, posiblemente, a la presencia de fases minerales de granate grosularia, que corresponde a silicatos de calcio y aluminio. Al_2O_3 también está potenciado por la presencia de aluminosilicatos en el tranque.

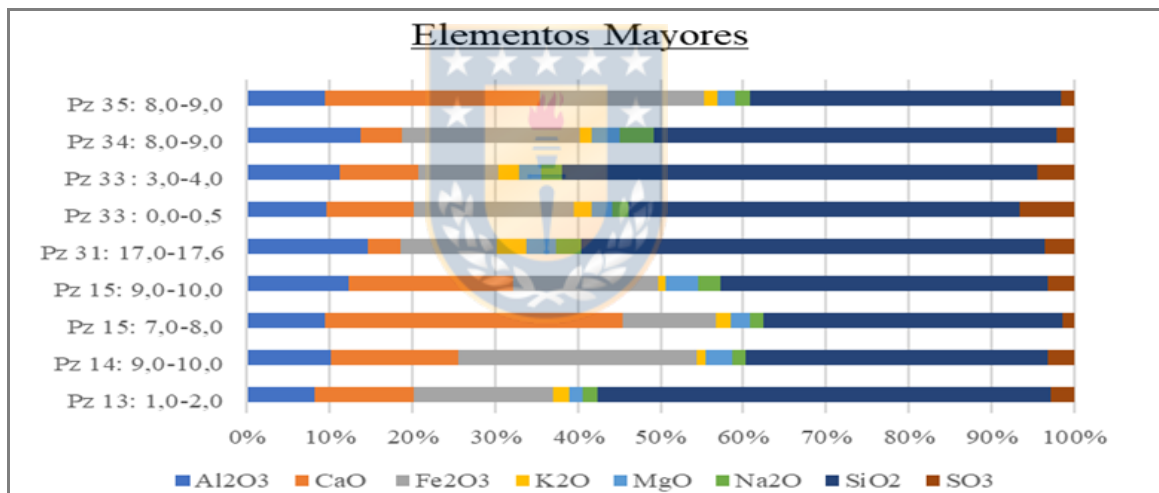


Figura 5.1: Elementos mayores normalizados al 100%. Se observa la predominancia del SiO_2 .

Los elementos mayores SO_3 , MgO , Na_2O y K_2O presentan un promedio de porcentaje en masa menor al 10% (sin normalización al 100%). El SO_3 tiene relación con la presencia de fases minerales de sulfuros en el tranque, como piritita y calcopiritita. El MgO puede deberse a la existencia de clinocloro y piroxenos, encontrándose el clinocloro presente en todo el tranque. Finalmente, Na_2O y K_2O tienen relación con la albita (plagioclasa sódica), ortoclasa (feldespato potásico) y las micas presentes en el tranque.

Los elementos menores se caracterizan por tener un porcentaje de concentración igual o menor al 1% en masa (10000 ppm). En la Figura 5.2 se puede observar la distribución de los elementos menores de mayor a menor concentración promedio, y al ser un diagrama de Pareto, muestra junto a las concentraciones, una curva con el porcentaje total acumulado. La Figura 5.2 nos permite observar que los principales elementos menores presentes en el tranque son CuO y P₂O₅, con una concentración promedio de 12580 ppm y 11839 ppm, respectivamente; Ambos elementos representan un poco más del 60% de total de elementos menores. Les sigue en concentración promedio el MnO (4173 ppm), TiO₂ (5156 ppm) y ZnO (2220 ppm), que juntos al CuO y P₂O₅, representan un acumulado de 90% del total de elementos menores; estos 5 elementos, son los únicos con concentraciones promedio entre 1000 y 10000 ppm.

El cobre (expresado como CuO) alcanza *peaks* de concentración cercanos a los 12000 ppm, con un *peak* máximo de 41100 ppm, siendo el elemento menor más abundante, lo que coincide con el reconocimiento de calcopirita en el tranque mediante DRX, lo que se podría asociar también a la presencia de diámetros diferentes a D80, posiblemente por un mal aprovechamiento del material en procesos de recuperación en la planta, previo a su depositación en el tranque. Por otra parte, no existe la presencia de sulfatos u oxidados de cobre que pudieran aportar en conjunto a los sulfuros observados.

El fósforo (expresado como P₂O₅) está presente en todas las muestras por sobre los 3000 ppm, es el segundo elemento menor más abundante, y al no existir en el tranque minerales ricos en fósforo, puede deber su anomalía a procesos metalúrgicos relacionados. En la Planta La Cocinera se recuperaban desde 1987 oxidados de cobre a través de pilas de lixiviación (Ramírez, 2015). La adición de cal para regular el pH en procesos de flotación, como también el uso de reactivos como el P₂F₅, usado como depresante del Cu en procesos de separación Cu-Mo en lixiviación, podrían ser la causa de una contaminación de fósforo en la ganga obtenida (Navarro *et al.*, 2000).

El MnO también se encuentra presente en todas las muestras, en concentraciones mayores a los 1000 ppm, cuya presencia guarda relación con fuertes anomalías presentes en la litología de la mina Panulcillo, ligada a procesos superficiales o al interior del skarn (Castellón, 2017).

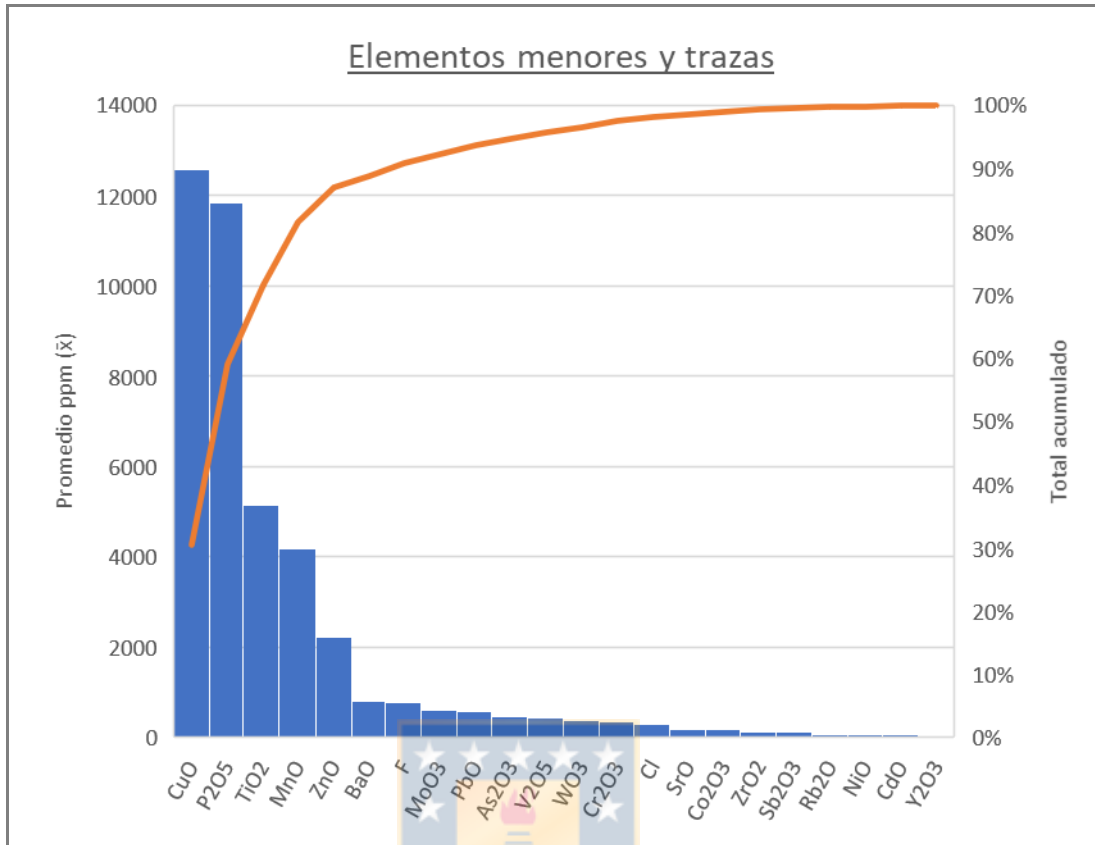


Figura. 5.2:

Diagrama de Pareto con distribución de elementos menores y trazas. Se muestra la distribución de los elementos de mayor a menor concentración promedio. La curva representa el porcentaje total acumulado.

La presencia abundante de TiO_2 , con un promedio de 5146 ppm, tiene relación con la presencia de filosilicatos, específicamente biotitas ricas en titanio observadas mediante DRX. ZnO es el último elemento con un promedio sobre los 1000 ppm, y su presencia posiblemente se debe a una fuerte anomalía en zonas supérgenas del skarn Panulcillo (Castellón, 2017), y puede resultar interesante económicamente en un futuro proceso de recuperación mineral. Otros elementos menores como el Cr_2O_3 , MoO_3 , Co_2O_3 , NiO , V_2O_5 y Sb_2O_3 , pese a que están presentes y son económicamente valorados, poseen concentraciones bajas, entre 50 y 600 ppm aproximadamente. Pese a lo anterior, elementos como el Itrio (expresado como Y_2O_3), que corresponde a las denominadas tierras raras, incluso estando en concentraciones bajas, en este caso en torno a los 14 ppm aproximadamente, puede resultar de interés económicos debido al carácter escaso de este tipo de elementos (Long *et al.*, 2010).

El wolframio (expresado como WO_3) en una de las muestras alcanza un *peak* de 886 ppm, con un promedio de 371 ppm entre todas las muestras, pero su presencia se debe a una contaminación debido al uso de bolas de wolframio en procesos de pulverizado y molienda (Gómez & Valle, 1983).

5.3. Recuperación

La minería ha sido una actividad importante a lo largo de la historia de Chile y el mundo, fomentando el desarrollo económico e industrial del país. Actualmente la minería constituye una de las actividades principales de la economía nacional, representando la producción de cobre la principal fuente de extracción minera, con un 91,1% del total de exportaciones mineras, que corresponden a US\$ 36677 millones al año 2019 (Consejo Minero, 2020). Como todo proceso industrial, la generación de residuos no es ajena a la minería, siendo los relaves, los principales depósitos residuales de la actividad minera, en donde se proyecta un aumento de estos depósitos, debido a la alta producción de la minería del cobre y de las bajas leyes de los depósitos minerales explotados (COCHILCO, 2016a), lo que genera un interés económico ante la posibilidad de recuperar minerales valiosos desde los depósitos de relaves.

La Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), a través de dos proyectos: “Identificación, cuantificación y extracción (bio) tecnológica de minerales/elementos de valor contenidos en depósitos de relaves” e “Investigación y Desarrollo para la Recuperación de Elementos de Valor Desde Relaves”, apuntan a establecer un sistema de monitoreo en tiempo real (Programa Tranque Inclusivo) y a la recuperación de elementos de valor desde los relaves (CORFO, 2016). Respecto a los elementos que pueden aportar un valor económico, se encuentra el cobre en primer lugar, seguido de tierras raras, cobalto, oro, plata, molibdeno, tungsteno, zinc, etc. La forma en que se extraigan estos elementos es determinante en el estado ambiental final del relave, por consiguiente, al extraer todos los metales de forma purificada sería ventajoso para los valores de venta del metal y ayudaría a una reducción del costo de cierre de un relave, ya que se trataría con un material inocuo, al que se le ha extraído metales que pudieran, a su abandono, causar diversos problemas ambientales a los ciclos naturales circundantes (CORFO, 2016).

El tranque N°2 de la Planta La Cocinera, posee condiciones propicias para una eventual recuperación de material mediante minería secundaria. El tranque tiene un volumen estimado de 1245333 m³ (a partir del volumen autorizado para el relave) y una masa de 1805732 t (SERNAGEOMIN, 2020a), por lo que se dispondría de abundante material para procesar. Producto de la caracterización química realizada y analizada, destacan diversos elementos, dentro de ellos el cobre, hierro, zinc, manganeso y fósforo. Pese a la abundancia de sulfuros, como la pirita, el relave presenta un pH ligeramente alcalino, con un promedio de 7,8 en las muestras estudiadas, lo que es esperable, debido a los resultados obtenidos en la concentración de CaO (14,76% en masa), siendo mayor al SO₃; lo anterior también se relaciona con la estabilidad química del relave, ya que un relave ácido generaría un ambiente propicio para la disolución de metales pesados a partir de los minerales depositados (Aduvire, 2006). Un ambiente ácido generaría una oxidación espontánea y natural de la pirita, en donde el ácido lixivante se podría generar a partir del mismo relave, pudiendo disolver (lixiviar) otros sulfuros presentes si el pH llegara a niveles muy bajos (pH 3,5). Por lo tanto, el tranque N°2, en estudio, sería químicamente estable debido a su pH 7,7 relativamente neutro a alcalino; lo que además, ayudaría a abaratar costos de procesamiento, ya que por ejemplo, la cal se considera un insumo crítico e indispensable en la industria minera, con un consumo nacional de 2 millones de toneladas, siendo el 90% del consumo nacional solo para minería, en donde sus principales funciones son en los procesos de flotación, actuando como regulador de pH, y entre otras funciones como absorbente de SO₃ en gases (COCHILCO, 2016b).

Los procesos de reducción de tamaño de partículas son importantes en minería, teniendo como objetivo llegar a un tamaño de grano que permita la liberación de mineral necesaria para que entregue el máximo valor económico y aumentar el área disponible para reacciones químicas (Metso Minerals, 2004). Las etapas de reducción suelen dividirse en función del tamaño de entrada y salida, partiendo con procesos de chancado con rocas directo de la mina, pasando por diversos procesos de molienda hasta obtener partículas finas. Las características granulométricas del tranque N° 2 de la Planta La Cocinera tendría ventajas económicas ante un escenario de recuperación de minerales, ya que procesos iniciales como tronadura de minas, chancado y molienda de rocas y partículas de gran tamaño no serían necesarios. El material en el tranque ya se encuentra disgregado y con una predominancia de tamaño de grano limo. Presenta además un

promedio de D80 de 88,3 μm , junto a un 71,2% para el parámetro -325# que corresponde al porcentaje de partículas que atravesaron un tamiz de 44 μm de apertura. Por lo que, a modo general, se tendría un material lo suficientemente fino para procesos de recuperación mediante flotación (Metso Minerals, 2004).

5.4. Evaluación del riesgo para la salud humana

Los depósitos de relaves son propensos a contener elementos en concentraciones que pueden ser perjudiciales para la salud de la población, especialmente cuando los relaves se encuentran aledaños a zonas urbanas. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), los elementos contaminantes prioritarios son: Sb, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y Zn (EPA, 2021). Otros autores hacen referencia, además de los nombrados anteriormente, a elementos como el Co, Pd, Pt, Sn y Te (Novotny, 1995). Los elementos contaminantes y potencialmente tóxicos que se encuentran en el tranque de relaves N°2 son: As, Cu, Ni, Pb, Zn, Co y Cr (Tabla 5.1).


Tabla 5.1: Elementos contaminantes prioritarios. Concentración corresponde a óxidos para cada elemento en el tranque N°2. Rango normal y concentración anormal modificado de Bowie & Thornton (1985).

Elemento	Concentración (ppm)	Rango normal (ppm)	Concentración anómala (ppm)
As	458	<5-40	Hasta 2500
Cu	12580	2-60	Hasta 2000
Ni	58	2-100	Hasta 8000
Pb	564	10-150	10000 o más
Zn	2220	25-200	10000 o más
Co	178	25-50	Sin información
Cr	338	50-200	Hasta 500

De acuerdo con la clasificación de las concentraciones de elementos en suelos según Bowie & Thornton (1985), las concentraciones normales corresponden a valores relacionados con el estado natural de los suelos. Las concentraciones que superan el rango normal y que están por debajo del rango anómalo, son valores en suelos con algún grado de intervención pero que no implican riesgos para la salud humana. Por último, concentraciones por sobre el rango anómalo son valores indicadores de potenciales riesgos para la salud por contaminantes tóxicos. Al tratarse de un tranque de relaves, es esperable que las concentraciones de los elementos potencialmente estén por

sobre los rangos normales. De los siete elementos que se observan en la Tabla 5.1, seis elementos sobrepasan el rango normal de concentración, salvo el níquel, que está dentro del rango normal. Respecto a las concentraciones anómalas, el único elemento que sobrepasa la concentración anómala es el cobre, con 12580 ppm. Que dichos elementos sobrepasen rangos normales de concentración es esperable al tratarse de un tranque de relaves usado para minería del cobre.

Para la evaluación del riesgo en la salud humana, se procede a la evaluación de la exposición de los elementos potencialmente peligrosos presentes en el tranque de relaves N°2, considerando As, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, Cr en sus concentraciones como óxidos. La evaluación de la exposición consiste en estimar las dosis suministradas de contaminante por parte del suelo según diferentes vías de exposición, y de acuerdo con la información disponible de las concentraciones de elementos, se evalúa la exposición a ingesta accidental (Ecuación 2) y la exposición al contacto dérmico (Ecuación 3) (EPA, 1996 en SAG, 2004). El detalle de los valores utilizados en las ecuaciones se encuentra en el Anexo VI.



$$\text{Dosis} = \frac{C_{\text{suelo}} \times \text{EF} \times \text{FI} \times \text{ED} \times \text{IR}_{\text{adulto,niño}} \times \text{CF}_1}{\text{BW}_{\text{adulto,niño}} \times \text{AT} \times \text{CF}_2} \quad (2)$$

En donde:

- C_{suelo} es la concentración del elemento (mg/kg).
- EF es la frecuencia de exposición (días/año).
- FI es la fracción de ingestión proveniente de la fuente contaminada (adimensional).
- ED es la duración de la exposición (años).
- IR es la tasa de ingestión de suelo (mg/día).
- CF_1 es el factor de conversión para la concentración del elemento (kg/mg).
- CF_2 es el factor de conversión para el tiempo de exposición (días/año).
- BW es el peso corporal de referencia de las personas (kg).
- AT es el tiempo de promediación (años), pudiendo ser 70 (cancerígeno) o 25 (no cancerígeno).

$$\text{Dosis} = \frac{C_{\text{suelo}} \times \text{CF}_4 \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{CF}_2 \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

En donde:

- C_{suelo} es la concentración del elemento (mg/kg).
- CF_4 es el factor de conversión con unidad $(\text{kg} \times \text{cm}^2)/(\text{mg} \times \text{m}^2)$.
- SA es la superficie expuesta de piel ($\text{m}^2/\text{día}$).
- AF es el factor de adherencia de la tierra (suelo) a la piel (mg/cm^2).
- ABS es el factor de absorción dérmica (adimensional).
- EF es la frecuencia de exposición (días/año).
- ED es la duración de la exposición (años).
- CF_2 es el factor de conversión para el tiempo de exposición (días/año).
- BW es el peso corporal de referencia de las personas (kg).
- AT es el tiempo de promediación (años), pudiendo ser 70 (cancerígeno) o 25 (no cancerígeno).

En la concentración del elemento (C_{suelo}), se utilizaron para el cálculo los valores de elementos expresados como óxidos (valores obtenidos previamente por FRX). El tiempo de promediación (AT) depende del tipo de efecto tóxico que se está evaluando, para exposiciones a tóxicos no cancerígenos se utiliza el valor del periodo de exposición (ED), en cambio, al evaluar exposiciones a tóxicos cancerígenos, se calcula promediando la dosis total acumulada durante el período vital humano; lo anterior se debe a que el efecto de la exposición a un cancerígeno debería ser el mismo si se tiene una exposición a baja concentración por un período prolongado de tiempo, en comparación una exposición a una alta concentración por corto periodo de tiempo (EPA, 1996 en SAG, 2004).

En la tabla 5.2 se observan los resultados obtenidos de las dosis por exposición vía ingesta accidental o contacto dérmico, tanto para un tiempo de promediación cancerígeno o no cancerígeno, utilizando las concentraciones promedio de los elementos del tranque de relaves N°2. Se observa que las dosis cancerígenas son mas bajas, debido a que la exposición al elemento es a mayor cantidad de tiempo en años, con un tiempo de promediación (AT) de 70 años, en comparación a las dosis no cancerígenas donde el tiempo de promediación es de 25 años.

El uso del suelo es determinante en los posibles escenarios de exposición, por lo que para el caso de un tranque de relaves, los resultados de las dosis de exposición están calculados para un uso de

suelo industrial. Una vez calculadas las dosis de exposición de contaminantes de interés a las que se pueden exponer las personas, éstas se deben comparar con valores de referencia, y para este estudio se utilizaron las normas indicadas por las agencias CDC (2021) y ECHA (2021) con el objetivo de determinar si las dosis implican o no un riesgo para la salud humana. La comparación con los valores de referencias de la CDC y ECHA demuestra que las concentraciones de todos los elementos prioritarios en el suelo no implican riesgos para la salud de la población, tanto por vía de ingesta accidental y contacto dérmico, debido a que las dosis calculadas se encuentran por debajo de los valores de referencia.

Tabla 5.2 Dosis suministradas por exposición vía ingestión accidental o contacto dérmico. Resultados expresados en mg/kg día. Valores de referencia modificado de CDC (2021) y ECHA (2021).

Elemento	Ingesta accidental		Contacto dérmico		Valores de referencia
	Dosis (cancerígena)	Dosis (no cancerígena)	Dosis (cancerígena)	Dosis (no cancerígena)	
As	0,000080	0,000224	0,000005	0,000014	0,0017
Cu	0,002198	0,006155	0,000139	0,000389	0,0110
Ni	0,000010	0,000028	0,000001	0,000002	0,0140
Pb	0,000099	0,000276	0,000006	0,000017	0,0020
Zn	0,000388	0,001086	0,000025	0,000069	0,3000
Co	0,000031	0,000087	0,000002	0,000006	0,6000
Cr	0,000059	0,000165	0,000004	0,000010	0,6000

En la metodología anterior hay que considerar que se utilizaron en el cálculo parámetros referenciales debido a la poca información disponible, por lo que se podría recomendar recopilar más datos para realizar un cálculo y una evaluación del riesgo en la salud más precisa. Al evaluar la toxicidad y la relación dosis-efecto, no solo depende de la concentración del elemento, sino que además hay que tener en cuenta el periodo de exposición, como también al efecto combinado de varios elementos (EPA, 1996 en SAG, 2004). También es importante precisar las características de la población afectada o población futura (posible uso residencial o permanencia en el sector), las características del sitio en estudio, nivel de vegetación y estabilidad del tranque (que pueden ser determinantes en la dispersión de material particulado a través del viento). Por último, al comparar los valores obtenidos, también es importante tener en cuenta el manejo a nivel gubernamental y las políticas públicas en el tratamiento de sitios contaminados, que varía en cada país con diferentes estándares, como también los posibles usos futuros del lugar y si existe un proyecto de acción sobre el lugar en estudio, ya que una misma zona puede ser multifuncional al

largo plazo, pudiendo cambiar el uso del suelo en el transcurso del tiempo. Por lo que son numerosas las variables presentes en una evaluación a la exposición de elementos tóxicos, siendo necesario un estudio detallado (idealmente con extracciones secuenciales), y un levantamiento de información mayor para un análisis preciso del impacto en la salud.

En Chile, el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) tiene una guía técnica como protocolo para realizar evaluaciones de riesgo ambiental y ecológico de suelos, en donde incluye la exposición por ingesta accidental y contacto dérmico (SAG, 2004). En la publicación de Rubinos *et al.* (2019) realizaron un estudio de la partición de elementos potencialmente tóxicos (PTEs, del inglés *potentially toxic elements*) y una evaluación de riesgos ambientales en relaves del norte de Chile, en donde concluyen que los relaves representan un riesgo alto para el medio ambiente, a través de la evaluación de un índice de riesgo potencial (PERI, del inglés *potential ecological risk index*), mediante procedimientos de extracción secuencial junto a análisis por Qemscan. Los relaves se encontrarían contaminados por Cu, Mo, As y Pb; debiéndose tener presente al reprocesar el material del relave tanto la movilización de aquellos elementos, como también el impacto al medio ambiente. Pese a que no detallan exactamente cuáles fueron los relaves estudiados, se espera que los resultados fueran semejantes en otros tranques de relaves, debido a la similitud de los procesos mineros extractivos en la minería del cobre en el norte del país, además del mismo marco legal que rige para todos los procesos productivos, que actualmente incluye una normativa de operación para depósitos de relaves (Ministerio de Minería, 2007). Por lo tanto, ya que en el último tiempo se han actualizado normativas ambientales y de procesos productivos, es probable que tranques de relaves antiguos superen parámetros ambientales considerados actualmente como peligrosos.

El Ministerio de Salud (MINSAL), a través del Decreto Supremo N°148 aprueba en el año 2004 un reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos (Ministerio de Salud, 2004), en el que se reglamenta las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas para la disposición, generación, almacenamiento, transporte y eliminación de residuos peligrosos. En el Artículo 23 del reglamento, se establece que no son considerados peligrosos diversos residuos mineros, incluyendo estériles, minerales de baja ley y residuos provenientes de lixiviación como los relaves y escorias; y solo en casos calificados, la autoridad podrá analizar la peligrosidad de dichos residuos cuando lo estime oportuno. Por lo tanto, se considera oportuno actualizar la clasificación de un residuo peligroso,

especialmente de residuos provenientes de la actividad minera, utilizando métodos de evaluación de riesgo como PERI, para que se genere una fiscalización constante y un monitoreo del riesgo de los relaves en la salud de la población y en el impacto ambiental.

5.5. Estado de los depósitos de relaves en Chile y normativa legal

Se han hecho esfuerzos a nivel gubernamental para mejorar la información que se tiene respecto a los relaves en Chile. El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), comenzó el año 2016 a través de su Departamento de Depósitos de Relaves, actual Oficina de Depósitos de Relaves de la Subdirección Nacional de Minería, un programa que consiste en un Catastro Nacional de Depósitos de Relaves, de carácter público, además de un Programa de Caracterización Geoquímica de Depósitos de Relaves (iniciado el año 2017), con un total de 757 relaves catastrados, actualizado a agosto del año 2020, aportando información básica como nombre, faena, ubicación, coordenadas, estado de la instalación, método de construcción, volumen actual, volumen autorizado, resolución ambiental y resolución del programa de cumplimiento (PdC). La caracterización geoquímica inició el año 2017 y consiste en la medición de sondajes en profundidad de algunos relaves que requieren mayor énfasis, ya sea por características ambientales o por valor económico, realizando la medición de 56 elementos y especies, desglosado en 12 elementos mayores, 30 elementos traza (por debajo del 1%) y 14 tierras raras (SERNAGEOMIN, 2020b).

La actividad minera en Chile se ha desarrollado desde tiempo muy antiguos, por lo que se debe tener en cuenta que existen relaves que no están sujetos a normas del Estado, cobrando mayor importancia contar con información detallada de cada depósito de relave en Chile. Muchos de estos relaves antiguos no han sido catastrados, por lo que, en ocasiones, su localización y composición son desconocidas, además de estar construidos sin una normativa ambiental, pudiendo generar efectos ambientales negativos. Actualmente, los depósitos de relaves deben cumplir con la normativa legal y ambiental vigente, exigida en el Decreto Supremo N° 248 del Ministerio de Minería, publicado en el Diario Oficial el 11 de abril de 2007, titulado: “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves”, cuyas disposiciones legales contemplan en su Artículo 1, fijar normas sobre los procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves, como también fijar requisitos de

diseño, construcción, operación y cierre de relaves mineros, garantizando la seguridad de las personas y de los bienes. En su Artículo 2, reglamenta que toda faena minera que genere y deposite relaves, está obligada a cumplir con las disposiciones del presente reglamento; por último, el Artículo 3 fija al SERNAGEOMIN, como el organismo responsable de aplicar y fiscalizar el reglamento dispuesto en el Decreto Supremo N° 248 (Ministerio de Minería, 2007).

En marzo del año 2021, el Ministerio de Minería convocó a consulta ciudadana (Resolución Exenta N° 625, publicada el 4 de marzo en el Diario Oficial) (Ministerio de Minería, 2021b), una propuesta de modificación al Decreto Supremo N° 248 de 2007, que tiene por objetivo, a grandes rasgos, actualizar aspectos relevantes de disposición y almacenamiento de relaves, asegurando la estabilidad física y química, desde se apertura a cierre. Además, contempla la implementación de un Sistema de Gestión del Depósito de Relaves, cuyos principios estén enfocados en la seguridad, medio ambiente y economía circular, lo que se traduciría en la práctica, en un monitoreo de la estabilidad física y de las aguas circundantes, la reubicación de depósitos de relaves abandonados en proyectos mineros nuevos, incluido en la mitigación del impacto ambiental, a través de Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Por último, la economía circular se trataría con la generación de oportunidades económicas mediante el fomento al reprocesamiento y reutilización de depósitos de relaves, promoviendo además la innovación, investigación e implementación de nuevas tecnologías (Ministerio de Minería, 2021c). Pese a los esfuerzos gubernamentales para catastrar y mejorar la información que se tiene de los depósitos de relaves, es solo el primer paso para generar una mejor convivencia con los poblados circundantes, faltando aún mucho trabajo, especialmente en el descubrimiento y estabilización de relaves abandonados.

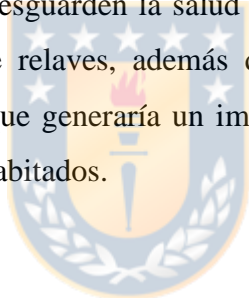
6. CONCLUSIONES

En base a los datos obtenidos mediante los diversos análisis realizados a las nueve muestras pertenecientes al tranque de relaves N°2 de la Planta La Cocinera, se concluyen los siguientes puntos:

1. La mineralogía presente está caracterizada por una fase mineralógica dominante compuesta por cuarzo, plagioclasa, calcita y granates. Luego una fase mineralógica menor, compuesta por feldespato potásico, olivinos, yeso, clinocloro, magnetita, hematita, pirita y micas. Finalmente, una fase mineralógica traza determinada por piroxenos, calcopirita, anfíbol. La fracción argílica está caracterizada por la presencia de illita, caolinita, esmectita y corrensita.
2. La distribución granulométrica del tranque está caracterizada por una textura granular, con tamaños de grano arena, limo y arcilla. Presenta una predominancia del tamaño limo, con partes menores de arena y arcilla; tratándose de un material fino bien graduado.
3. La distribución química del tranque está determinada, en primer lugar, por los elementos mayores: SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Na_2O y K_2O . Los elementos menores más importantes, y que concentran el 80% del segmento son: Cu, P, Mn, Ti y Zn; presentando concentraciones promedio sobre los 1000 ppm. Los elementos trazas más relevantes son: Cr, Mo, Co, Ni, V, Sb, Cd, W e Y; el itrio destaca ya que se trata de un elemento de las tierras raras.
4. La mineralogía presente en el tranque N°2 proviene principalmente del yacimiento de Panulcillo, presentando una mineralogía de ganga esperable, debido a la presencia de minerales que son evidencias del skarn asociado al yacimiento, como son los granates de la serie de la ugrandita; y por otra parte, la presencia de albita, clorita y calcita en tranque, guardarían relación con las alteraciones acontecidas en Panulcillo, como la alteración propilítica, que generó albitización de las plagioclasas, como también una cloritización de las biotitas.

5. El tranque N°2 posee condiciones propicias para la recuperación del material de valor económico, principalmente debido a sus características texturales como material disgregado granular, los parámetros D80 de 88,3 μm y -325# de 71,2%, que representan un material fino apto para procesos de recuperación, además de poseer un pH 7,7 ligeramente alcalino. Pese a lo anterior, el resultado de pruebas metalúrgicas son las que pueden determinar finalmente la factibilidad y rentabilidad de recuperación de elementos con una concentración abundante y de interés económico como el cobre, hierro, zinc, manganeso y fósforo.

6. Para una evaluación del riesgo de los tranques de relaves en la salud humana, se recomienda contar con la mayor cantidad de información posible y un estudio detallado de todas las variables relacionadas, idealmente utilizando índices de riesgo potencial (PERI), que permitan evaluar el riesgo real de los tranques de relaves. También es importante actualizar la clasificación de residuos peligrosos, específicamente de los residuos mineros, con el fin de generar políticas públicas que resguarden la salud de las personas y los ambientes naturales circundantes a los tranques de relaves, además de fortalecer la mitigación ambiental en proyectos mineros nuevos, lo que generaría un impacto positivo en aquellos relaves que se encuentran cercanos a lugares habitados.



7. REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Bailey, S. W. (1982). Nomenclature for regular interstratifications. *American Mineralogist*, 67, 394-398.
- Borchardt, G. (1977). Montmorillonite and other smectite minerals. En J. Dixon, & S. Weed, *Minerals in Soil Environments* (págs. 293-330). Madison: Soil Science Society of America.
- Bowie, S., & Thornton, I. (1985). *Environmental geochemistry and health. Report to the Royal Society's British National Committee for Problems of the Environment*. Dordrecht : Springer.
- Bragg, W. H. (1913). The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88(605), 428-438.
- Castellón, R. M. (2017). *Geología del yacimiento de Panulcillo, características geoquímicas y control estructural de cuerpos mineralizados (Tesis de Magister)*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
- CDC. (2021). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2021, de U.S. Department of Health & Human Services: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. (W. Gibbons, & M. T., Edits.) *Geological Society London Special Publications*, 21-116.
- COCHILCO. (2016a). *Proyección de la producción esperada de cobre en Chile 2016 - 2027*. Comisión Chilena del Cobre.
- COCHILCO. (2016b). *Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Comisión Chilena del Cobre.
- Consejo Minero. (2020). *Cifras actualizadas de la minería*. Recuperado el 3 de marzo de 2021, de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/04/Cifras-actualizadas-de-la-mineria-Marzo-actualizado-2020.pdf>
- CORFO. (2016). *Guía técnica convocatoria programas tecnológicos estratégicos: "Recuperación de elementos de valor en depósitos de relaves"*. Recuperado el 4 de febrero de 2021, de https://www.uchile.cl/documentos/guia-tecnica-recuperacion-de-elementos-de-valor-en-depositos-de-relaves_123778_2_3734.pdf

- Cyr, M. (2001). Particle size distribution of fine powders by LASER diffraction spectrometry. Case of cementitious materials. *Materials and Structures*, 34, 342-350.
- Del Real, I., Thompson, J., & Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. *Ore Geology Reviews*, 102.
- Deutsch, J. L. (2012). Latin hypercube sampling with multidimensional uniformity. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 142, 763–772.
- Díaz, A., & Corvalán, M. M. (2015). Modelo genético preliminar de mina Panulcillo y su relación con los depósitos de Fe-P y del tipo IOCG presentes en la Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa (PMCC), región de Coquimbo, norte de Chile. *XIV Congreso Geológico de Chile*, (págs. 409-412). La Serena.
- D-maps. (2021). *d-maps: mapas gratuitos*. Recuperado el 5 de diciembre de 2020, de Mapa Región de Coquimbo (Chile): https://d-maps.com/carte.php?num_car=184575
- ECHA. (2021). *European Chemicals Agency*. Recuperado el 4 de septiembre de 2021, de Registration Dossier: <https://echa.europa.eu/es/home>
- Emparan, C., & Pineda, G. (2006). *Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, región de Coquimbo. Escala 1:100.000*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, Núm. 96.
- ENAMI. (2011). *Planta Delta*. Recuperado el 25 de septiembre de 2020, de Empresa Nacional de Minería: <http://www.enami.cl/PlantaBeneficios>
- ENAMI. (2016). *Informe técnico vida útil Mina Panulcillo-Mina Base Planta Delta*. Empresa Nacional de Minería.
- Fuentes, C. (2007). *Zonación de regímenes hídricos mediante índices bioclimáticos de la zona comprendida entre la III y X región (Memoria de Título)*. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.
- Gómez, A., & Valle, F. (1983). Contaminación por wolframio en la molienda de muestras para análisis. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 22(6), 325-220.
- González, E. (1954). Estudio geológico-económico del distrito minero de Panulcillo y regiones vecinas. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 11(11), 45-92.
- Groves, D., Bierlein, F., Meinert, L., & Hitzman, M. (2010). Iron oxide copper-fold (IOCG) deposits through earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105, 641–654.
- Jenkins, R. (1999). *X-Ray Fluorescence Spectrometry*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- Kumar, A. (2014). Total reflection X-ray fluorescence spectroscopy: Working principles. *International Journal Of Core Engineering & Management (IJCEM)*, 1, 36-55.
- Lambe, W., & Whitman, R. (2004). *Mecánica de suelos*. (Noriega, Ed.) D.F., México: Editorial Limusa S.A.
- Lestussi, M. (2018). *Apunte de Geoquímica: Contenidos Mínimos*. Catamarca: Editorial Científica Universitaria. Universidad Nacional de Catamarca.
- LINAN. (2021). *Manual de Operación del difractor de rayos X*. Recuperado el 20 de octubre de 2020, de <http://www.linan-ipicyt.mx/Manual%20XRD.pdf>
- Liu, Z. Z., Li, W., & Yang, M. (2015). Two general extension algorithms of Latin hypercube sampling. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-9.
- Llaumett, C., Olcay, L., Marin, C., Mardquardt, J. C., & Reyes, E. (1975). El yacimiento cobre porfídico "Andacollo", Provincia de Coquimbo, Chile. *Revista Geológica de Chile* N°2, 56-66.
- Long, K., Van Gosen, B., Foley, N., & Cordier, D. (2010). The Principal Rare Earth Elements. *USGA Scientific Investigations Report 2010-5220*. Recuperado el 28 de enero de 2021, de <https://geology.com/usgs/ree-geology/>
- Maksaev, V. (2001). *Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis Andina*. Recuperado el 16 de octubre de 2020, de <https://www.academia.edu/6912168/>
- Melgarejo, J. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- Metso Minerals. (2004). *Conocimientos Básicos en el Procesamiento de Minerales*. Metso Minerals.
- Meunier, A. (2005). *Clays*. Berlín: Springer.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences* 32, 1378-1388.
- Mindat. (2021). *Ugrandite*. Recuperado el 20 de enero de 2021, de Hudson Institute of Mineralogy: <https://www.mindat.org/min-4079.html>
- Ministerio de Minería. (2007). *Decreto N° 248*. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de <http://bcn.cl/2f8x6>
- Ministerio de Minería. (2021a). *Glosario Minero*. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de <https://www.minmineria.cl/glosario-minero-s/sondajes/>

- Ministerio de Minería. (2021b). Resolución 625 exenta. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de <http://bcn.cl/2q250>
- Ministerio de Minería. (2021c). *Propuesta de actualización de Decreto Supremo N° 248/2007*. Santiago. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de https://www.minmineria.cl/decreto_supremo_248/index.html
- Ministerio de Salud. (2004). *Decreto N°148*. Recuperado el 3 de septiembre de 2021, de <http://bcn.cl/2f93u>
- MMA. (2015). *Atlas de Cambio Climático de la Zona Semiárida de Chile*. Santiago: Fondo de Protección Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente.
- Nauditt, A., Kretschmer, N., & Ribbe, L. (2014). *Limarí River Basin Study Phase I – Current conditions, history and plans*. Colonia: Institute for Technology and Resources Management.
- Navarro, P., Simpson, J., & Vargas, C. (2000). Eliminación de fósforo desde concentrados de molibdenita vía lixiviación. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 3(6), 37-42.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (Segunda ed.). UK: Wiley-Blackwell.
- Novotny, V. (1995). Diffuse sources of pollution by toxic metals and impact on receiving. *Heavy Metals. Environmental Science*, 33-52.
- Núñez, J., & Barón, J. (1999). *Técnicas estadísticas avanzadas en el análisis de de grandes modelos computacionales*. Mendoza: Centro de Estudios de Ingeniería Asistida por Computadora (CEDIAC).
- Pineda, G., & Emparan, C. (2006). *Geología del área Vicuña-Pichasca, región de Coquimbo. Escala 1:100.000*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, Núm. 97.
- Poppe, L. J., Paskevich, V. F., Hathaway, J. C., & Blackwood, D. S. (2001). A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction. *USGS Open-File Report 2001-41*.
- Puerres, J., Ibarguen, E., & Cerón, M. (2021). Aplicaciones del método de hipercubo latino para la estimación de parámetros de modelos matemáticas desde una perspectiva pedagógica. *Revista Boletín Redipe 10 (5)*, 208–219.
- Ramírez, E. (2015). *Análisis de la problemática de las Pymes de la industria minera de la IV Región de Chile. Estudio de actores participantes mediante ARS y ANP (Tesis Doctoral)*. Valencia: Departamento de Proyectos de Ingeniería, Universitat Politècnica de València.
- Restrepo, O., Restrepo, J. C., & Tobón, J. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *Dyna*, 73(150), 131-141.

- Rubinos, D., Jeréz, O., Forghani, G., Edraki, M., & Kelm, U. (2019). Partitioning of Potentially Toxic Elements and Environmental Risk Assessment in Copper Tailings from Chile. *Sustainable Mining 2019*. Santiago.
- Ruiz, C. (1965). Distribución y origen de la mineralización en Chile. En *Revista Minerale*s (págs. 46-54). Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas. Apartado N°26.
- Runge, K., Tabosa, E., & Jankovic, A. (2003). Particle size distribution effects that should be considered when performing flotation geometallurgical testing. *The Second AUSIMM International Geometallurgy Conference*, 335-344 .
- SAG. (2004). *Riesgos ambientales asociados a sitios contaminados*. Santiago: Servicio Agrícola y Ganadero. Ministerio de Agricultura.
- Schlumberger. (2021). *Oilfield Glossary: Clay*. Recuperado el 4 de enero de 2021, de <https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/c/clay>
- SERNAGEOMIN. (2020a). *Programa de Caracterización de Depósitos de Relaves de Chile*. Departamento de Evaluación de Proyectos Mineros. Recuperado el 23 de enero de 2021, de <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- SERNAGEOMIN. (2020b). *Datos Públicos Depósito de Relaves*. Recuperado el 23 de enero de 2021, de <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- SERNAGEOMIN. (2021). *Preguntas frecuentes sobre relaves*. Recuperado el 8 de septiembre de 2020, de <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves>
- SONAMI. (1999). *Manual de prácticas ambientales: Exploración Minera*. Santiago de Chile: Comisión de Medio Ambiente de SONAMI.
- Strauch, G., Oyarzún, R., Reinstorf, F., Oyarzun, J., Schirmer, M., & Knoller, K. (2009). Interaction of water components in the semi-arid Huasco and Limarí river basins, North Central Chile. *Advances in Geosciences*, 22, 51–57.
- Sugaki, A., Campos, E., & Kojima, S. (2000). Mineralogy of the Panulcillo skarn copper deposit, Coquimbo Region, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 27(2), 139-155.
- Sympatec GmbH. (2021). *Particle Measurement: Laser Diffraction*. Recuperado el 14 de septiembre de 2020, de <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/>
- Tellería, C. (2014). Aplicación de fluorescencia de rayos-x por reflexión total en la determinación de concentración de zinc en cabello de niños para la estimación de niveles nutricionales. *Revista Boliviana de Física*, 24, 1-6.
- Thomas, H. (1967). *Geología de la Hoja de Ovalle, Provincia de Coquimbo* (Vol. 23). Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas. Editorial Universitaria S.A.

- USDA. (1987). *Soil Mechanics Level 1. Module 3: USDA Soil Textural Classification (Study Guide)*. Washington DC: USDA-Soil Conservation Service.
- USDA. (1998). *Soil Quality Indicators: pH*. Obtenido de USDA-Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (1999). *Guia para la evaluacion de la calidad y salud del suelo*. Washington, DC: USDA-Instituto de Calidad de Suelos.
- USDA. (2012). *National Engineering Handbook. Part 63. Chapter 3: Engineering Classification of Earth Materials*. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (Décima segunda ed.). Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Villela, D., & Cantallopts, J. (2016). *Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera*. COCHILCO: Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- Zentilli, M. (1974). *Geological evolution and metallogenic relationships in the Andes of northern Chile, between 26 and 29 south (Ph.D. Thesis)*. Kingston, Canada: Queen's University.



ANEXOS



ÍNDICE DE ANEXOS

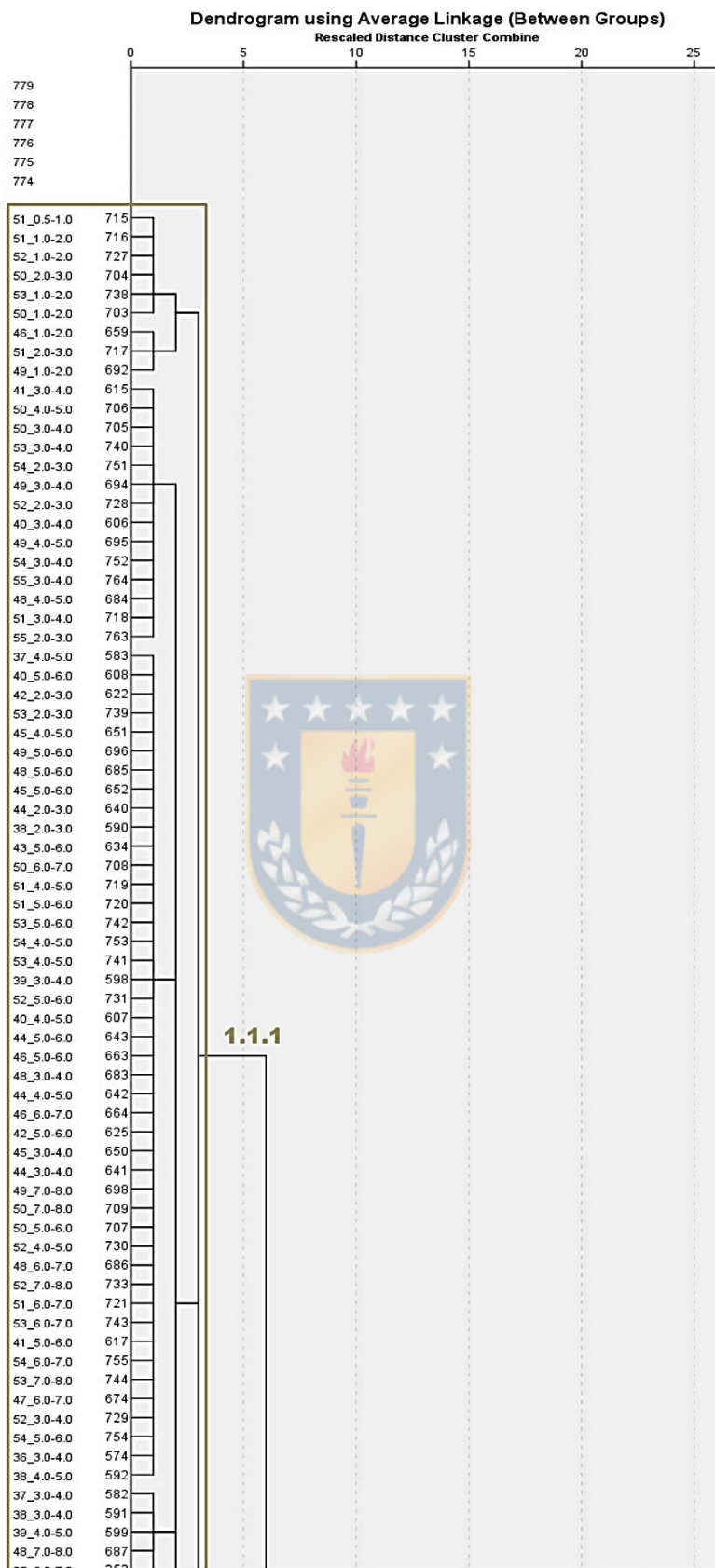
ANEXO	Página
I Muestreo de Hipercubo Latino	72
II Análisis Macroscópico	79
III Análisis Granulométrico por Difracción Láser	89
IV Análisis por Difracción de Rayos X	99
V Análisis por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X	118
VI Evaluación del riesgo para la salud humana	128





ANEXO I

Muestreo de Hipercubo Latino



Continuación del Anexo I

25_6.0-7.0	352
46_4.0-5.0	662
47_3.0-4.0	671
43_4.0-5.0	633
55_4.0-5.0	765
55_5.0-6.0	766
42_3.0-4.0	623
49_6.0-7.0	697
47_4.0-5.0	672
42_4.0-5.0	624
41_4.0-5.0	616
52_6.0-7.0	732
47_5.0-6.0	673
43_3.0-4.0	632
52_9.0-10.0	735
53_10.0-11.1	747
41_1.0-2.0	613
43_1.0-2.0	630
44_6.0-7.0	644
45_6.0-7.0	653
47_8.0-9.0	676
C_0.0-0.5	76
41_6.0-7.6	618
38_5.0-6.3	593
40_6.0-7.0	609
43_6.0-7.0	635
14_0.0-0.5	144
42_6.0-7.0	626
36_2.0-3.0	573
43_0.0-0.5	628
39_2.0-3.0	597
46_0.5-1.0	658
37_2.0-3.0	581
37_1.0-2.0	580
43_2.0-3.0	631
54_1.0-2.0	750
45_2.0-3.0	649
46_2.0-3.0	660
47_2.0-3.0	670
54_7.0-8.0	756
36_1.0-2.0	572
47_0.5-1.0	668
48_2.0-3.0	682
49_2.0-3.0	693
45_1.0-2.0	648
38_1.0-2.0	589
48_8.0-9.0	688
50_8.0-9.0	710
27_0.0-0.5	399
47_7.0-8.0	675
51_7.0-8.0	722
49_8.0-9.0	699
53_8.0-9.0	745
54_9.0-10.0	758
54_8.0-9.0	757
52_8.0-9.0	734
53_9.0-10.0	746
44_1.0-2.0	639
26_24.0-25.0	394
27_23.0-24.0	422
46_8.0-8.8	666
14_10.0-11.0	155
34_8.0-9.0	545
A4_7.0-8.0	47
33_A4.0-5.0	524
35_11.0-12.0	566
42_0.5-1.0	620
43_0.5-1.0	629
49_0.0-0.5	690
29_17.0-18.0	464
46_7.0-8.0	665
42_1.0-2.0	621
51_0.0-0.5	714
52_0.5-1.0	726
39_0.5-1.0	595
40_1.0-2.0	604
49_0.5-1.0	691
50_0.5-1.0	702
44_0.5-1.0	638
53_0.5-1.0	737
36_0.0-0.5	570
54_0.5-1.0	749
40_0.5-1.0	603

1.1.2

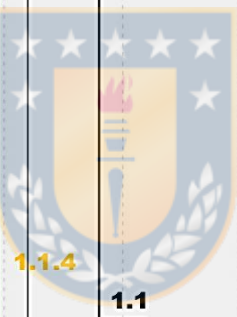
1.1.3



Continúa en la página 67

Continuación del Anexo I

36_0.5-1.0	571
14_11.0-12.1	156
36_4.0-5.0	575
23_15.0-16.0	318
33_B4.0-5.0	532
39_5.0-6.0	600
41_2.0-3.0	614
53_0.0-0.5	736
55_0.0-0.5	760
52_0.0-0.5	725
55_0.5-1.0	761
40_0.0-0.5	602
41_0.0-0.5	611
45_0.0-0.5	646
47_0.0-0.5	667
42_0.0-0.5	619
44_0.0-0.5	637
46_0.0-0.5	657
50_0.0-0.5	701
B_12.0-13.0	72
27_26.0-27.0	425
34_10.0-11.0	547
34_11.0-12.0	548
34_12.0-13.0	549
A_9.0-10.0	11
A2_7.0-8.0	28
25_21.0-22.0	367
26_23.0-24.0	393
27_20.0-21.0	419
27_21.0-22.0	420
26_21.0-22.0	391
48_9.0-10.1	689
49_9.0-10.1	700
45_7.0-8.0	654
50_10.0-11.0	712
39_6.0-7.2	601
43_7.0-7.7	636
44_7.0-8.3	645
A2_0.0-0.5	20
50_9.0-10.0	711
13_0.0-0.5	121
47_9.0-10.0	677
50_11.0-11.5	713
55_1.0-2.0	762
D_1.0-2.0	101
D_2.0-3.0	102
37_5.0-6.0	584
54_0.0-0.5	748
D_0.0-0.5	99
32_16.0-17.0	517
34_15.0-16.0	552
26_25.0-26.0	395
27_25.0-26.0	424
34_16.0-17.6	553
31_16.0-17.0	498
34_14.0-15.0	551
31_17.0-17.6	499
34_13.0-14.0	550
32_17.0-18.5	518
27_22.0-23.0	421
27_24.0-25.0	423
D_0.5-1.0	100
42_7.0-7.8	627
51_9.0-10.0	724
54_10.0-11.0	759
A2_1.0-2.0	22
26_22.0-23.0	392
A4_1.0-2.0	42
55_6.0-7.0	767
55_7.0-8.0	768
A4_5.0-6.0	45
13_9.0-10.0	131
13_11.0-12.0	133
B_11.0-12.0	71
A_7.0-8.0	9
33_B5.0-6.0	533
34_5.0-6.0	542
33_A6.0-6.6	526
13_8.0-9.0	130
C_11.0-12.0	88
15_9.0-10.0	167
A2_6.0-7.0	27



1.1.4

1.1

1.1.5

Continuación del Anexo I

C_13.0-14.0	90				
A_8.0-9.0	10				
25_22.0-23.5	368				
A4_6.0-7.0	46				
A2_5.0-6.0	26				
33_A0.0-0.5	519				
33_B0.0-0.5	527				
31_0.0-0.5	481				
35_2.0-3.0	557				
E_0.5-1.0	117				
E_1.0-2.3	118				
37_0.0-0.5	578				
38_0.0-0.5	587				
37_0.5-1.0	579				
38_0.5-1.0	588				
48_0.0-0.5	679				
48_0.5-1.0	680				
39_0.0-0.5	594				
41_0.5-1.0	612				
39_1.0-2.0	596				
45_0.5-1.0	647				
33_A1.0-2.0	521				
33_B1.0-2.0	529				
33_A2.0-3.0	522				
33_B3.0-4.0	531				
33_B2.0-3.0	530				
33_A3.0-4.0	523				
15_0.0-0.5	157				
15_0.5-1.0	158				
23_5.0-6.0	309				
29_1.0-2.0	448				
24_5.0-6.0	331				
32_6.0-7.0	507				
17_0.5-1.0	185				
30_1.0-2.0	467				
18_0.5-1.0	203				
20_1.0-2.0	245				
26_1.0-2.0	371				
21_1.0-2.0	265				
24_1.0-2.0	327				
21_2.0-3.0	266				
22_1.0-2.0	285				
25_1.0-2.0	347				
27_2.0-3.0	402				
16_6.0-7.0	175				
18_5.0-6.0	208				
17_5.0-6.0	190				
18_4.0-5.0	207				
15_5.0-6.0	163				
27_5.0-6.0	405				
28_4.0-5.0	433				
30_5.0-6.0	471				
16_5.0-6.0	174				
19_4.0-5.0	230				
23_4.0-5.0	308				
32_5.0-6.0	506				
16_3.0-4.0	172				
17_2.0-3.0	187				
22_5.0-6.0	289				
23_2.0-3.0	306				
15_3.0-4.0	161				
20_0.5-1.0	244				
21_0.5-1.0	264				
32_2.0-3.0	503				
22_4.0-5.0	288				
29_3.0-4.0	450				
26_3.0-4.0	373				
20_3.0-4.0	247				
19_3.0-4.0	229				
27_4.0-5.0	404				
31_3.0-4.0	485				
32_3.0-4.0	504				
23_3.0-4.0	307				
28_2.0-3.0	431				
22_3.0-4.0	287				
29_2.0-3.0	449				
35_3.0-4.0	558				
20_2.0-3.0	246				
22_2.0-3.0	286				
25_2.0-3.0	348				
21_5.0-6.0	269				
31_5.0-6.0	487				
17_4.0-5.0	180				

1.1.6

1.2.1

1.2.2

1.2



Continúa en la página 69

Continuación del Anexo I

17_4-0-0	189				
17_1-0-2.0	186				
24_2-0-3.0	328				
20_5-0-6.0	249				
26_5-0-6.0	375				
25_5-0-6.0	351				
24_4-0-5.0	330				
24_6-0-7.0	332				
25_3-0-4.0	349				
27_3-0-4.0	403				
26_2-0-3.0	372				
35_4-0-5.0	559				
25_4-0-5.0	350				
28_3-0-4.0	432				
29_4-0-5.0	451				
32_4-0-5.0	505				
21_4-0-5.0	268				
26_4-0-5.0	374				
30_4-0-5.0	470				
31_4-0-5.0	486				
18_3-0-4.0	206				
20_4-0-5.0	248				
15_4-0-5.0	162				
17_3-0-4.0	188				
24_3-0-4.0	329				
16_4-0-5.0	173				
30_3-0-4.0	469				
21_3-0-4.0	267				
34_0-0-0.5	536				
35_0-0-0.5	554				
14_3-0-4.0	148				
34_2-0-3.0	539				
35_5-0-6.0	560				
15_2-0-3.0	160				
31_2-0-3.0	484				
19_2-0-3.0	228				
18_2-0-3.0	205				
30_2-0-3.0	468				
16_2-0-3.0	171				
20_0-0-0.5	243				
31_0-5-1.0	482				
26_0-0-0.5	369				
31_1-0-2.0	483				
16_1-0-2.0	170				
28_1-0-2.0	430				
15_1-0-2.0	159				
26_0-5-1.0	370				
25_0-5-1.0	346				
18_1-0-2.0	204				
22_0-0-0.5	283				
24_0-5-1.0	326				
25_0-0-0.5	345				
24_0-0-0.5	325				
14_0-5-1.0	145				
21_0-0-0.5	263				
C_0-5-1.0	77				
16_0-0-0.5	168				
30_0-0-0.5	465				
27_0-5-1.0	400				
27_1-0-2.0	401				
17_0-0-0.5	184				
35_0-5-1.0	555				
35_1-0-2.0	556				
18_0-0-0.5	202				
19_0-5-1.0	226				
19_0-0-0.5	225				
30_0-5-1.0	466				
23_0-5-1.0	304				
23_0-0-0.5	303				
33_A0-5-1.0	520				
33_B0-5-1.0	528				
28_0-0-0.5	428				
28_0-5-1.0	429				
29_0-0-0.5	446				
13_0-5-1.0	122				
14_2-0-3.0	147				
14_1-0-2.0	146				
34_0-5-1.0	537				
34_1-0-2.0	538				
32_0-5-1.0	501				
32_1-0-2.0	502				
51_8-0-9.0	723				
32_0-0-0.5	500				

1.2.2



1.2.3

Continuación del Anexo I

19_1.0-2.0	227			
22_0.5-1.0	284			
23_1.0-2.0	305			
29_0.5-1.0	447			
16_0.5-1.0	169			
13_1.0-2.0	123			
20_6.0-7.0	250			
27_6.0-7.0	406			
35_6.0-7.0	561			
28_5.0-6.0	434			
29_5.0-6.0	452			
21_6.0-7.0	270			
15_6.0-7.0	164			
22_6.0-7.0	290			
26_6.0-7.0	376	1.3.1		
23_6.0-7.0	310			
19_5.0-7.0	231			
31_6.0-7.0	488			
29_6.0-7.0	453			
30_6.0-7.0	472			
17_6.0-7.0	191			
25_7.0-8.0	353			
26_9.0-10.0	379			
30_8.0-9.0	474			
22_9.0-10.0	293			
24_10.0-11.0	336			
17_7.0-8.0	192			
18_7.0-8.0	210			
24_8.0-9.0	334			
25_9.0-10.0	355			
16_9.0-10.0	177			
27_9.0-10.0	409			
30_9.0-10.0	475			
31_8.0-9.0	490			
23_7.0-8.0	311			
29_7.0-8.0	454			
32_7.0-8.0	508			
18_6.0-7.0	209			
30_7.0-8.0	473			
21_7.0-8.0	271			
23_8.0-9.0	312			
22_8.0-9.0	292			
16_7.0-8.0	176			
19_7.0-8.0	232			
22_7.0-8.0	291			
25_8.0-9.0	354			
21_8.0-9.0	272			
20_7.0-8.0	251	1.3.2		
26_8.0-9.0	378			
28_8.0-9.0	437			
20_8.0-9.0	252			
28_7.0-8.0	436			
27_7.0-8.0	407			
32_8.0-9.0	509			
31_7.0-8.0	489			
15_7.0-8.0	165			
35_7.0-8.0	562			
27_8.0-9.0	408			
32_9.0-10.0	510			
26_7.0-8.0	377			
35_8.0-9.0	563			
15_8.0-9.0	166			
21_9.0-10.0	273			
17_8.0-9.0	193			
18_8.0-9.0	211			
29_9.0-10.0	456			
23_9.0-10.0	313	1.3.3		
29_8.0-9.0	455			
20_9.0-10.0	253			
19_8.0-9.0	233			
24_7.0-8.0	333			
28_6.0-7.0	435			
B_10.0-11.0	70			
13_10.0-11.0	132			
C_12.0-13.0	89	1.3.4		
B_9.0-10.0	69			
14_9.0-10.0	154			
A2_4.0-5.0	25			
40_2.0-3.0	605			
46_3.0-4.0	661			
47_1.0-2.0	669	1.4		
48 1.0-2.0	681			



FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 13: 1,0-2,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris	Color en Sup. Alterada	Gris parduzco
Compacidad	Microporoso	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Arena fina	Forma de Grano	Subprismoidal/ Subangular
Composición		Cuarzo	30%
		Plagioclasa	30%
		Pirita	10%
		Indeterminado	30%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos finos a medios en los dedos, lo que indicaría presencia de tamaño arena. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - La identificación de la plagioclasa puede ser confundida con cuarzo. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 14: 9,0-10,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris	Color en Sup. Alterada	Gris verduzco
Compacidad	Microporoso	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Limo	Forma de Grano	Esférico/Subangular
Composición		Cuarzo	50%
		Olivino	10%
		Pirita	10%
		Indeterminado	30%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos muy finos en los dedos, lo que indicaría presencia de tamaño limo. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Granate observado de tono pardo oscuro, se reconoce solo por color. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Tonalidad verduzca posiblemente por presencia de clorita. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 15: 7,0-8,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris claro	Color en Sup. Alterada	Gris verdusco
Compacidad	Compacto	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Limo arcilloso	Forma de Grano	Esférico/Subangular
Composición		Cuarzo	40%
		Calcita	20%
		Arcilla	10%
		Indeterminado	30%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos muy finos, posiblemente a la presencia de arcilla, generando una textura más sedosa entre los dedos. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Muestra reacciona a HCL, posiblemente por la calcita presente (granos grises) - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Presencia de granos muy finos grises, posiblemente arcillas. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 15: 9,0-10,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Café grisáceo	Color en Sup. Alterada	Gris anaranjado
Compacidad	Compacto	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Limo	Forma de Grano	Esférico/Subangular
Composición		Cuarzo	40%
		Granate	20%
		Arcilla	10%
		Indeterminado	30%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos muy finos, posiblemente a la presencia de arcilla, generando una textura más sedosa entre los dedos. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Presencia de granos muy finos, posiblemente arcillas. - Posibles granates observados de tonos pardo-anaranjados (oxidados), se reconocen solo por color. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 31: 17,0-17,6		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Café pardo	Color en Sup. Alterada	Café amarillento
Compacidad	Microporoso	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Arena fina	Forma de Grano	Esférico/Subangular
Composición		Cuarzo	40%
		Plagioclasa	20%
		Hematita	10%
		Indeterminado	30%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos finos a medios, posiblemente por la presencia de granos tamaño arena. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Hematita se reconoce por tonos pardo-rojizos (posiblemente oxidados), se reconocen solo por color. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 33: 0,0-0,5		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris	Color en Sup. Alterada	Gris pardo
Compacidad	Microporoso	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Arena fina	Forma de Grano	Esférico/Angular
Composición		Cuarzo	50%
		Magnetita	10%
		Hematita	10%
		Indeterminado	30%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos finos a medios, posiblemente por la presencia de granos tamaño arena. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Hematita observada presenta tonos pardo-rojizos, se reconocen solo por color. - Se identifica magnetita debido a que a la lupa se observa un leve magnetismo de algunos granos oscuros. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 33: 3,0-4,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris pardo oscuro	Color en Sup. Alterada	Gris pardo claro
Compacidad	Microporoso	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Arena fina	Forma de Grano	Subprismoidal/ Subangular
Composición		Cuarzo	50%
		Plagioclasa	20%
		Pirita	2%
		Indeterminado	28%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos finos a medios, posiblemente por la presencia de granos tamaño arena. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Pirita oxidada. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 34: 8,0-9,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris pardo claro	Color en Sup. Alterada	Café pardo
Compacidad	Compacto	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Limo	Forma de Grano	Subprismoidal/ Subangular
Composición		Cuarzo	50%
		Plagioclasa	20%
		Arcilla	5%
		Indeterminado	25%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos finos, posiblemente por la presencia de granos tamaño limo. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Dentro de los indeterminados se observan granos negro-rojizos, posiblemente hematita o granate, pero debido al tamaño de grano fino no se pueden identificar correctamente. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA			
Muestra	Pz 35: 8,0-9,0		
Características Generales			
Aspecto	Granular	Textura	Detrítica
Color en Sup. Fresca	Gris	Color en Sup. Alterada	Gris pardo
Compacidad	Compacto	Coherencia	Deleznable
Tamaño de Grano	Limo arcilloso	Forma de Grano	Esférico/ Subredondeado
Composición		Cuarzo	40%
		Calcita	20%
		Arcilla	20%
		Indeterminado	20%
Observaciones			
<ul style="list-style-type: none"> - Muestra corresponde a material granular no consolidado, por lo que no se pueden utilizar criterios de clasificación de rocas sedimentarias. - Al tacto se sienten granos muy finos, posiblemente por la presencia de arcilla. - Granos indeterminados posiblemente son óxidos de hierro o ferromagnesianos por tonalidad oscura, no se pueden determinar por el tamaño del grano fino. - Porcentajes de composición son inexactos debido a la dificultad de observación con el tamaño de grano fino. - Granos muy finos de tonalidad gris claro se consideraron como arcilla. - Observación realizada en lupa binocular Nikon SMS-10 con aumento de 40X. 			



ANEXO III

Análisis Granulométrico por Difracción Láser



Universidad de Concepción
 Instituto de Geología Económica Aplicada
 Laboratorio de Arcillas



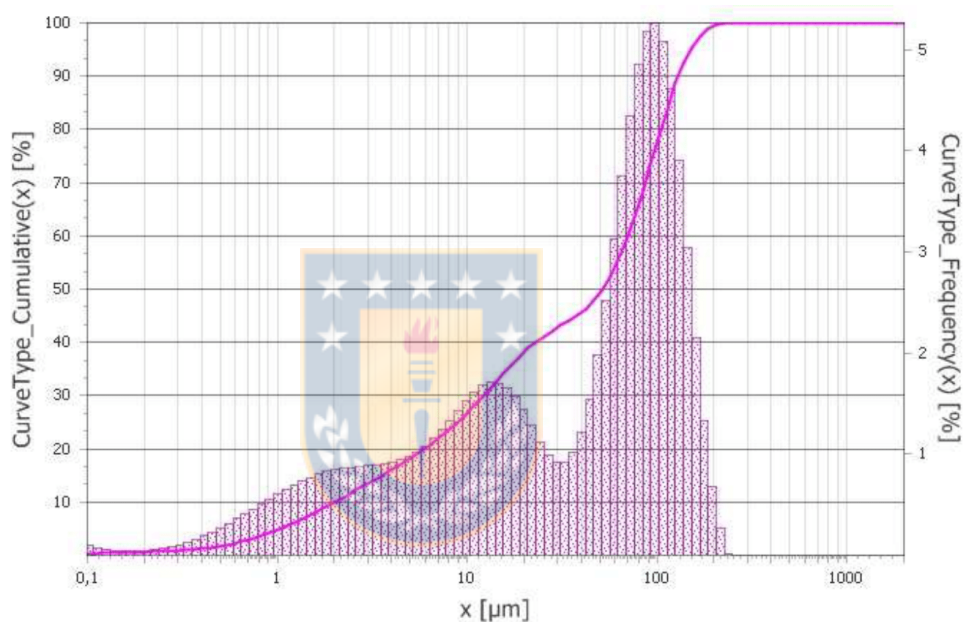
7 AÑOS
 UNIVERSIDAD ACREDITADA
 HASTA NOVIEMBRE DE 2023
 COMISIÓN NACIONAL
 de Acreditación
 CNA-Chile
 CREDITED INSTITUTION - INVESTIGACIÓN
 ORDENANZA POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
 VINCULACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 24 julio 2018
Muestra: PZ 13: 01-02 (1)
Solicita:

Operador:
Compañía: ENAMI
OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)
Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer
Oscuridad del haz: 17,0 %
Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,3
5	1
10	2
20	5,9
30	12,2
40	22,8
50	51,4
60	70,1
70	86,6
80	104,8
90	129,7
95	149,9
99	185,6

Q3(x) [%]	x [μm]
10	2
16,1	4
26,8	10
38,2	20
45,1	38
46,7	43
54,8	61
62,4	74
94,4	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
Instituto de Geología Económica Aplicada
Laboratorio de Arcillas



7 AÑOS
UNIVERSIDAD ACREDITADA
HASTA NOVIEMBRE DE 2023
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
CNA-Chile
CREDITO INSTITUCIONAL - INVESTIGACIÓN POSTGRADO - INVESTIGACIÓN VINCULADA CON EL MEDIO

Fecha: 20 agosto 2018

Muestra: PZ 14: 9-10 (2)

Solicita:

Operador:

Compañía:

OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl

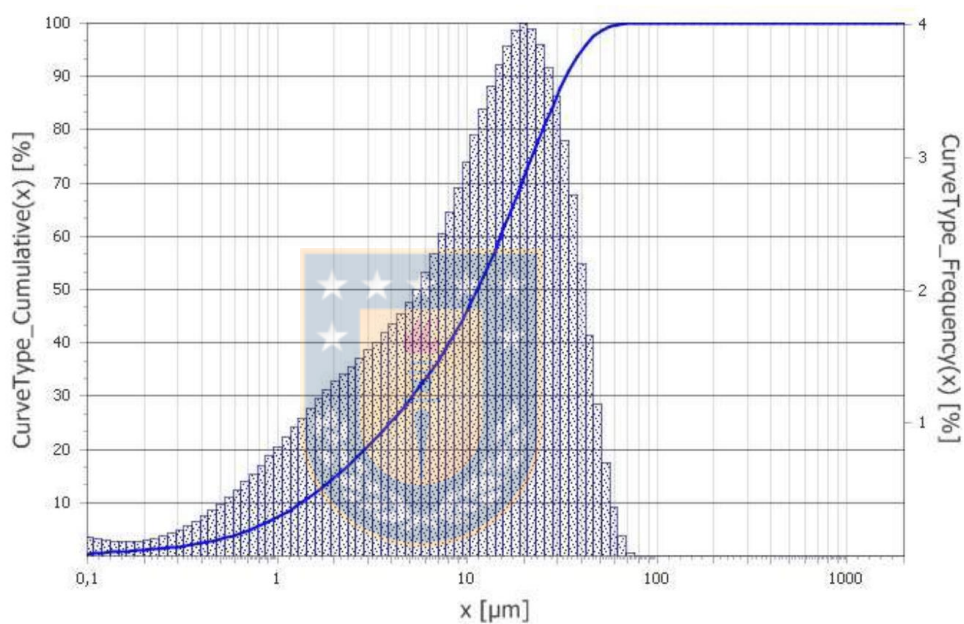
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)

Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer

Oscuridad del haz: 20,0 %

Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,2
5	0,7
10	1,3
20	2,9
30	5,1
40	8
50	11,3
60	15,1
70	19,4
80	25
90	33,3
95	40,2
99	52,9

Q3(x) [%]	x [μm]
14,8	2
25,3	4
46,1	10
71,1	20
93,8	38
96,4	43
99,7	61
100	74
100	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
 Instituto de Geología Económica Aplicada
 Laboratorio de Arcillas



7 AÑOS
 COMISIÓN NACIONAL
 de Acreditación
 CNA-Chile
 UNIVERSIDAD ACREDITADA
 HASTA NOVIEMBRE DE 2023
 CREDITO INSTITUCIONAL - INVESTIGACIÓN PROFESORADO
 JURISDICCIA POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
 VINCULACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 20 agosto 2018

Muestra: PZ 15: 7-8 (1)

Solicita:

Operador:

Compañía:

OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl

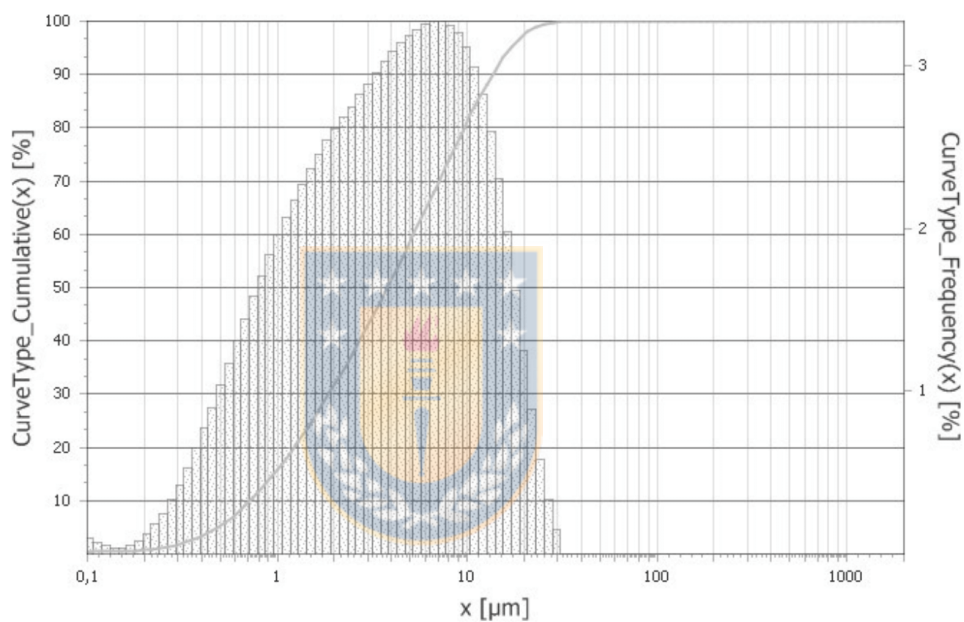
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)

Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer

Oscuridad del haz: 34,0 %

Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,2
5	0,5
10	0,7
20	1,2
30	1,9
40	2,7
50	3,8
60	5,2
70	7,1
80	9,6
90	13,6
95	17
99	23,3

Q3(x) [%]	x [μm]
31,8	2
51,6	4
81,2	10
97,5	20
100	38
100	43
100	61
100	74
100	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
Instituto de Geología Económica Aplicada
Laboratorio de Arcillas



7 AÑOS
UNIVERSIDAD ACREDITADA
HASTA NOVIEMBRE DE 2023
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN CNA-Chile
CICLO INSTITUCIONAL - INVESTIGACIÓN PROFESORADO
CICLO INSTITUCIONAL - INVESTIGACIÓN POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
INVESTIGACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 20 agosto 2018

Muestra: PZ 15: 9-10 (1)

Solicita:

Operador:

Compañía:

OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl

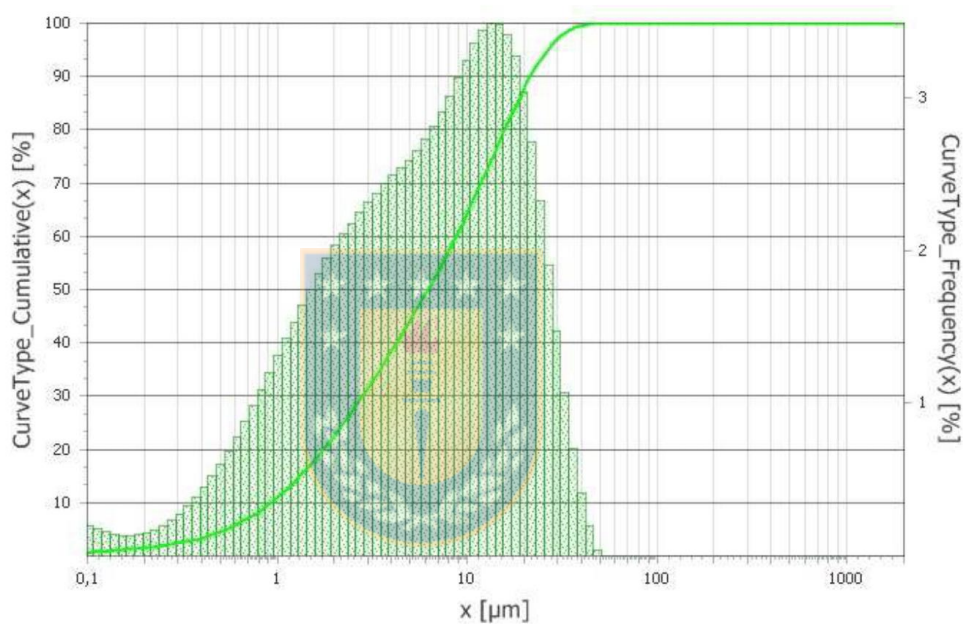
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)

Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer

Oscuridad del haz: 20,0 %

Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,1
5	0,5
10	0,9
20	1,7
30	2,8
40	4,2
50	6,2
60	8,7
70	11,8
80	15,8
90	21,6
95	26,6
99	36,1

Q3(x) [%]	x [μm]
22,7	2
38,5	4
64,3	10
87,8	20
99,4	38
99,8	43
100	61
100	74
100	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
 Instituto de Geología Económica Aplicada
 Laboratorio de Arcillas



7 AÑOS
 Comisión Nacional
 de Acreditación
 CNA-Chile
 UNIVERSIDAD ACREDITADA
 HASTA NOVIEMBRE DE 2023
 SECTOR EDUCACIONAL - EDUCACIÓN PROFESIONAL
 EDUCACIÓN PROFESIONAL - INVESTIGACIÓN
 VINCULACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 08 agosto 2018

Muestra: PZ 31: 17.0-17.6 (1)

Solicita:

Operador:

Compañía:

OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl

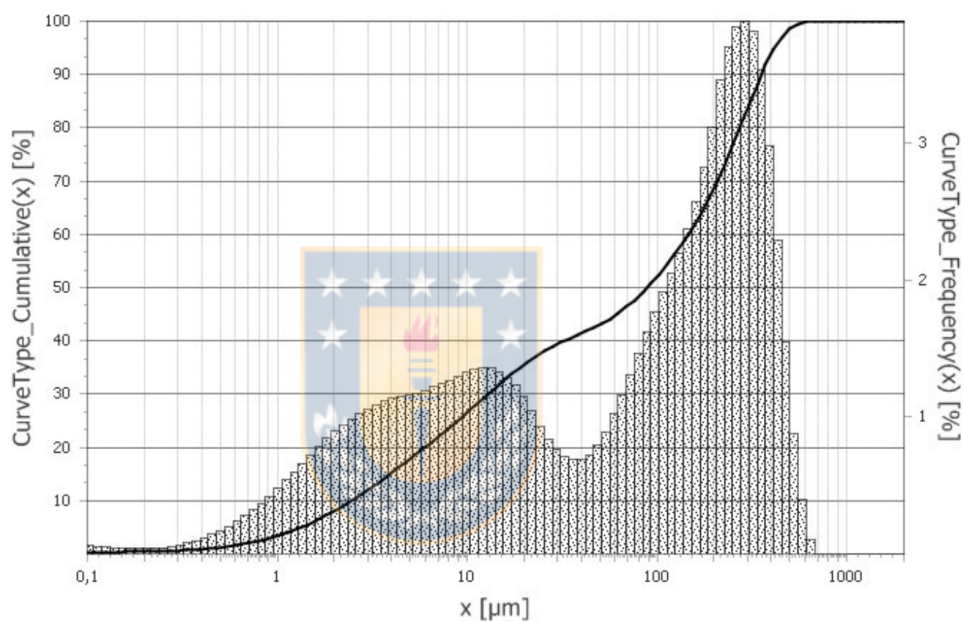
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)

Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer

Oscuridad del haz: 14,0 %

Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,4
5	1,3
10	2,4
20	6
30	12,9
40	32,4
50	88,5
60	145,9
70	208,1
80	272,9
90	354,8
95	415,8
99	524,9

Q3(x) [%]	x [μm]
8,1	2
15,3	4
26,5	10
35,6	20
41,1	38
42	43
45	61
47,3	74
60,2	147
89,6	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
Instituto de Geología Económica Aplicada
Laboratorio de Arcillas



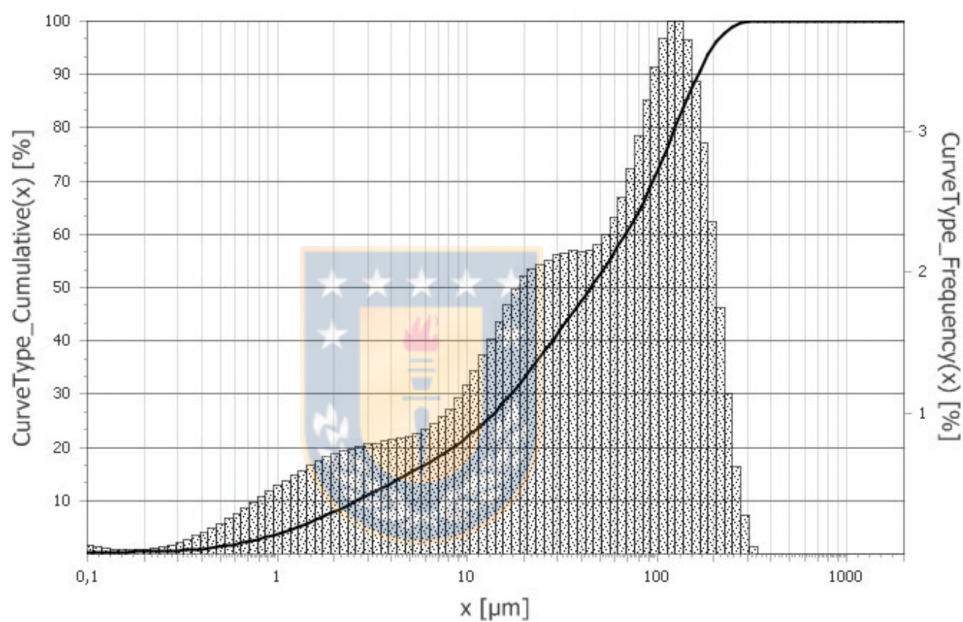
7 AÑOS
UNIVERSIDAD ACREDITADA
HASTA NOVIEMBRE DE 2023
COMISIÓN NACIONAL de Acreditación
CNA-Chile
CREDITO INSTITUCIONAL - DOCENCIA PREGRADO
DOCENCIA POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 08 agosto 2018
Muestra: PZ 33B: 0.0-0.5 (1)
Solicita:

Operador:
Compañía:
OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)
Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer
Oscuridad del haz: 18,0 %
Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,4
5	1,3
10	2,6
20	8,4
30	17
40	28
50	44,5
60	68,2
70	95
80	124,7
90	164,2
95	195,9
99	249,5

Q3(x) [%]	x [μm]
8	2
13,3	4
22	10
33,1	20
46,6	38
49,3	43
57,2	61
62,2	74
86,1	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
Instituto de Geología Económica Aplicada
Laboratorio de Arcillas



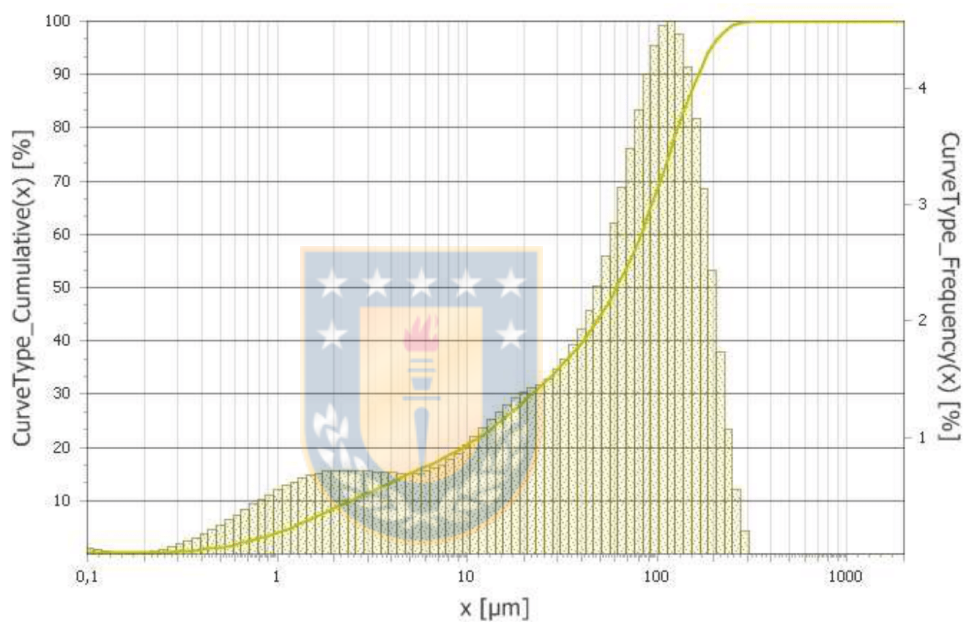
7 AÑOS
UNIVERSIDAD ACREDITADA
HASTA NOVIEMBRE DE 2023
COMISIÓN NACIONAL
de Acreditación
CNA-Chile
CREDITO INSTITUCIONAL - DOCENCIA PREGRADO
DOCENCIA POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 08 agosto 2018
Muestra: PZ 33B: 3.0-4.0 (1)
Solicita:

Operador:
Compañía:
OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)
Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer
Oscuridad del haz: 16,0 %
Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,4
5	1,2
10	2,4
20	9,5
30	21,9
40	40,5
50	61,4
60	82,1
70	103,9
80	129,4
90	164,7
95	193,9
99	245

Q3(x) [%]	x [μm]
8,6	2
13,5	4
20,5	10
28,7	20
38,8	38
41,2	43
49,8	61
56,1	74
85,6	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
 Instituto de Geología Económica Aplicada
 Laboratorio de Arcillas



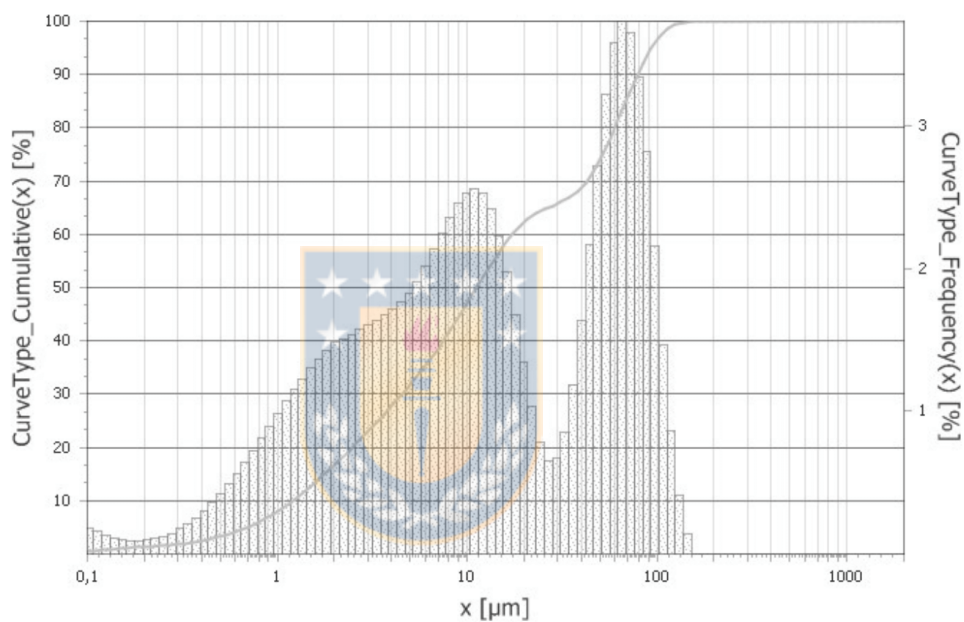
7 AÑOS
 COMISIÓN NACIONAL
 de Acreditación
 CNA-Chile
 UNIVERSIDAD ACREDITADA
 HASTA NOVIEMBRE DE 2023
 CREDITO INSTITUCIONAL - DOCENCIA PREGRADO
 DOCENCIA POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
 VINCULACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 28 agosto 2018
Muestra: PZ 34: 8.0-9.0 (1)
Solicita:

Operador:
Compañía:
OT:

FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)
Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer
Oscuridad del haz: 18,0 %
Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,1
5	0,7
10	1,2
20	2,5
30	4,5
40	7,5
50	11,2
60	17,3
70	42,5
80	60
90	78,9
95	93
99	118,9

Q3(x) [%]	x [μm]
16,7	2
27,8	4
47,1	10
62,3	20
68,1	38
70,3	43
80,6	61
87,8	74
99,9	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



Universidad de Concepción
Instituto de Geología Económica Aplicada
Laboratorio de Arcillas



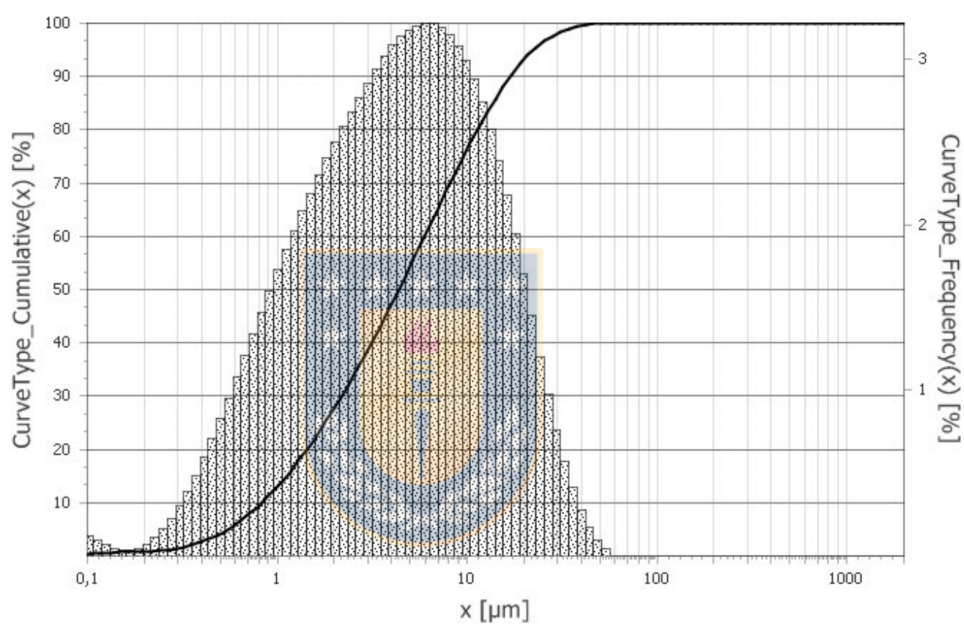
7 AÑOS
UNIVERSIDAD ACREDITADA
HASTA NOVIEMBRE DE 2023
COMISIÓN NACIONAL
de Acreditación
CNA-Chile
CREDITO INSTITUCIONAL - INVESTIGACIÓN
DOCENCIA POSTGRADO - INVESTIGACIÓN
VINCULACIÓN CON EL MEDIO

Fecha: 24 agosto 2018
Muestra: PZ 35: 8.0-9.0 (1)
Solicita:

Operador:
Compañía:
OT:

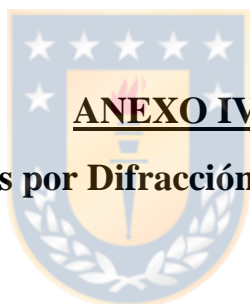
FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus / MaSControl
No. de Scan: 100 (Rango fino) / 100 (Rango grueso)
Rango: 0,08 - 2000 μm

Calculo: Fraunhofer
Oscuridad del haz: 18,0 %
Canales: 102



Q3(x) [%]	x [μm]
1	0,2
5	0,5
10	0,8
20	1,4
30	2,2
40	3,1
50	4,4
60	6
70	8,1
80	11,3
90	16,8
95	22,3
99	34,3

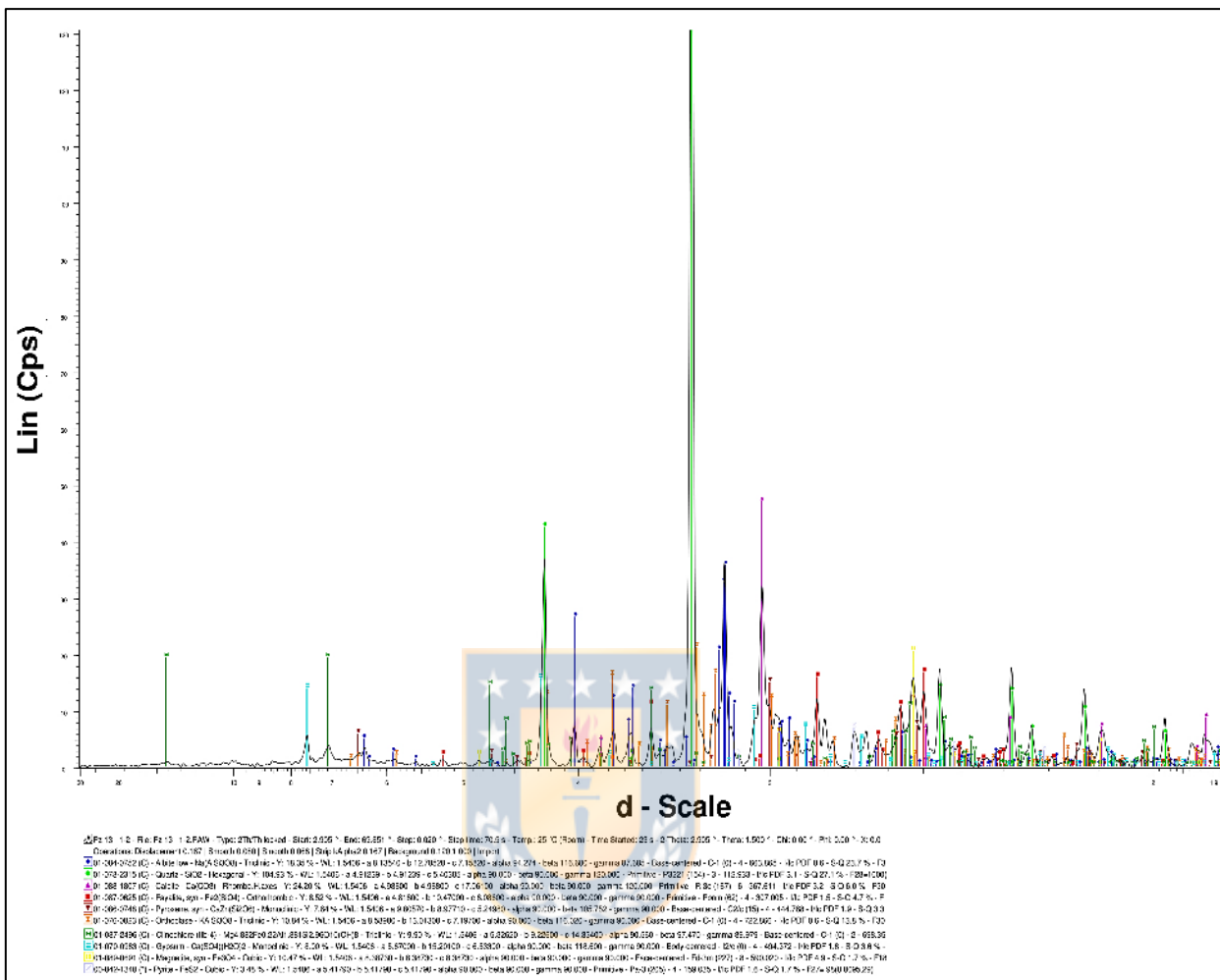
Q3(x) [%]	x [μm]
27,8	2
47,3	4
76,3	10
93,3	20
99,4	38
99,7	43
100	61
100	74
100	147
100	351
100	833
100	1.651
100	2.000



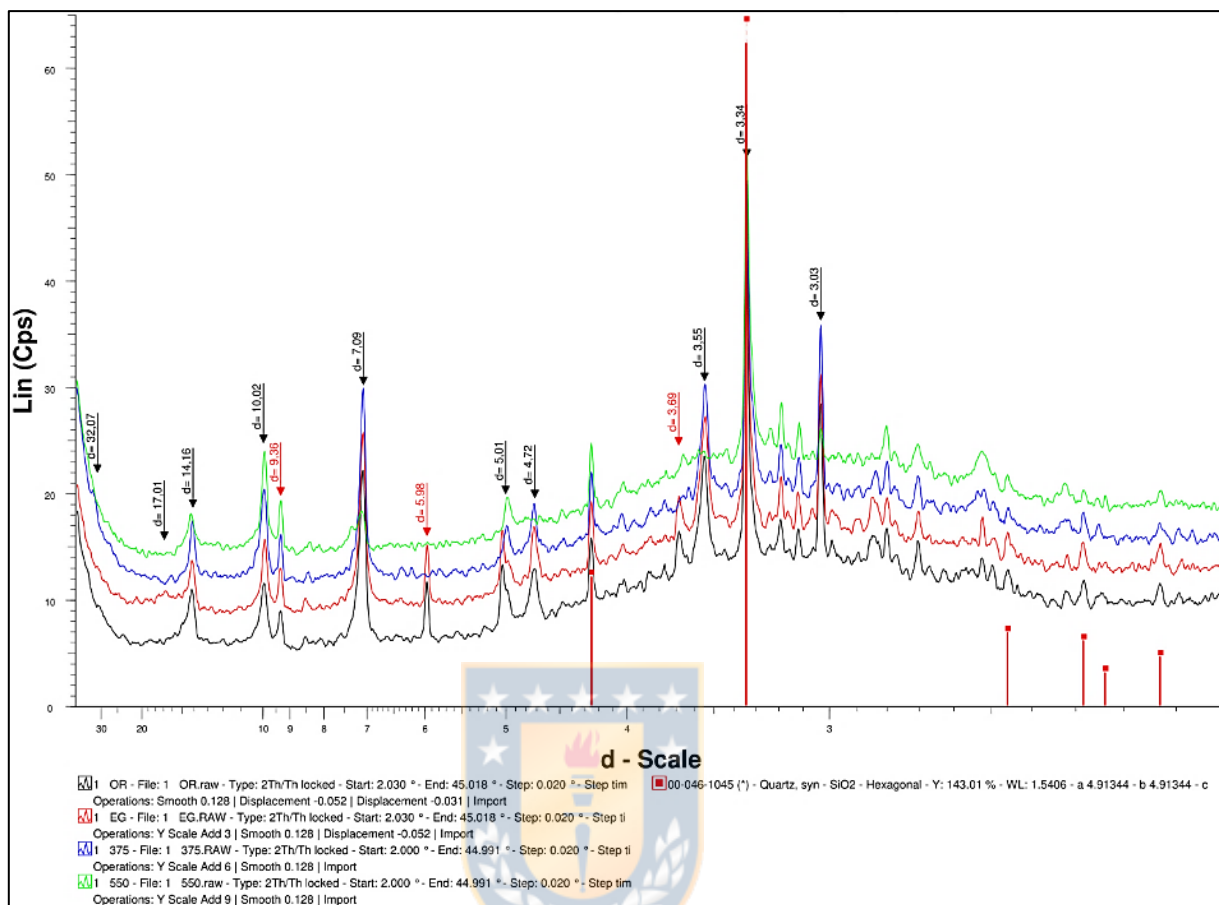
ANEXO IV

Análisis por Difracción de Rayos X

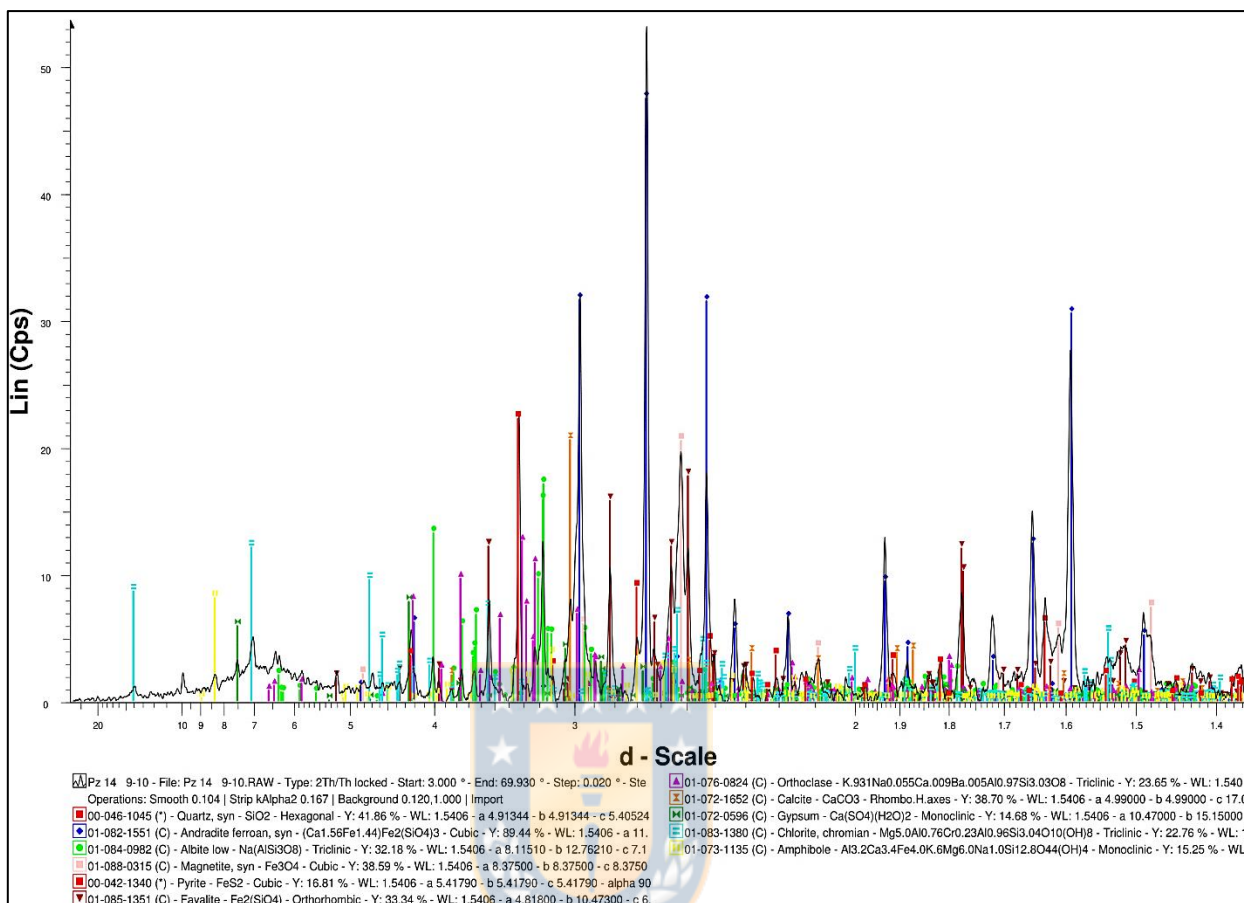
Pz 13: 1,0-2,0 (muestra total)



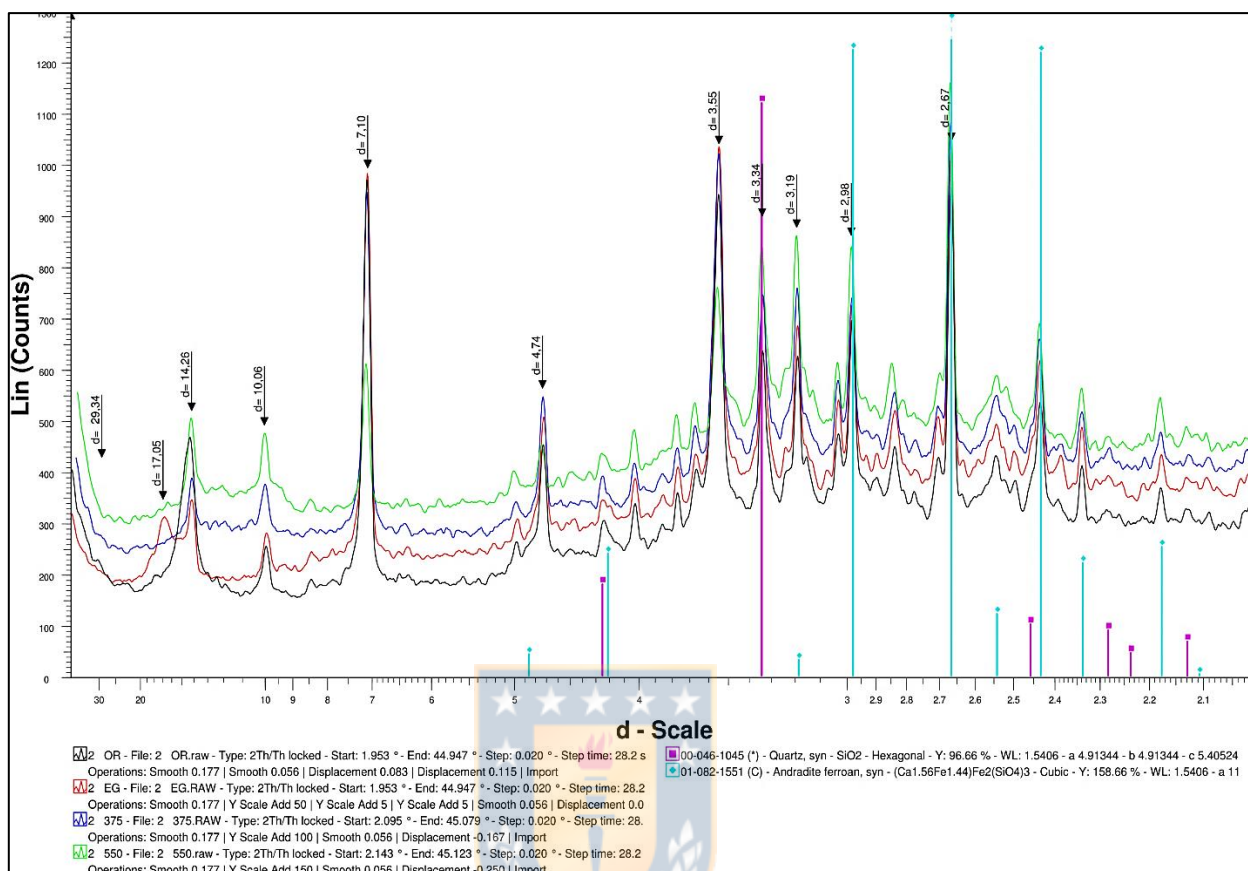
Pz 13: 1,0-2,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)

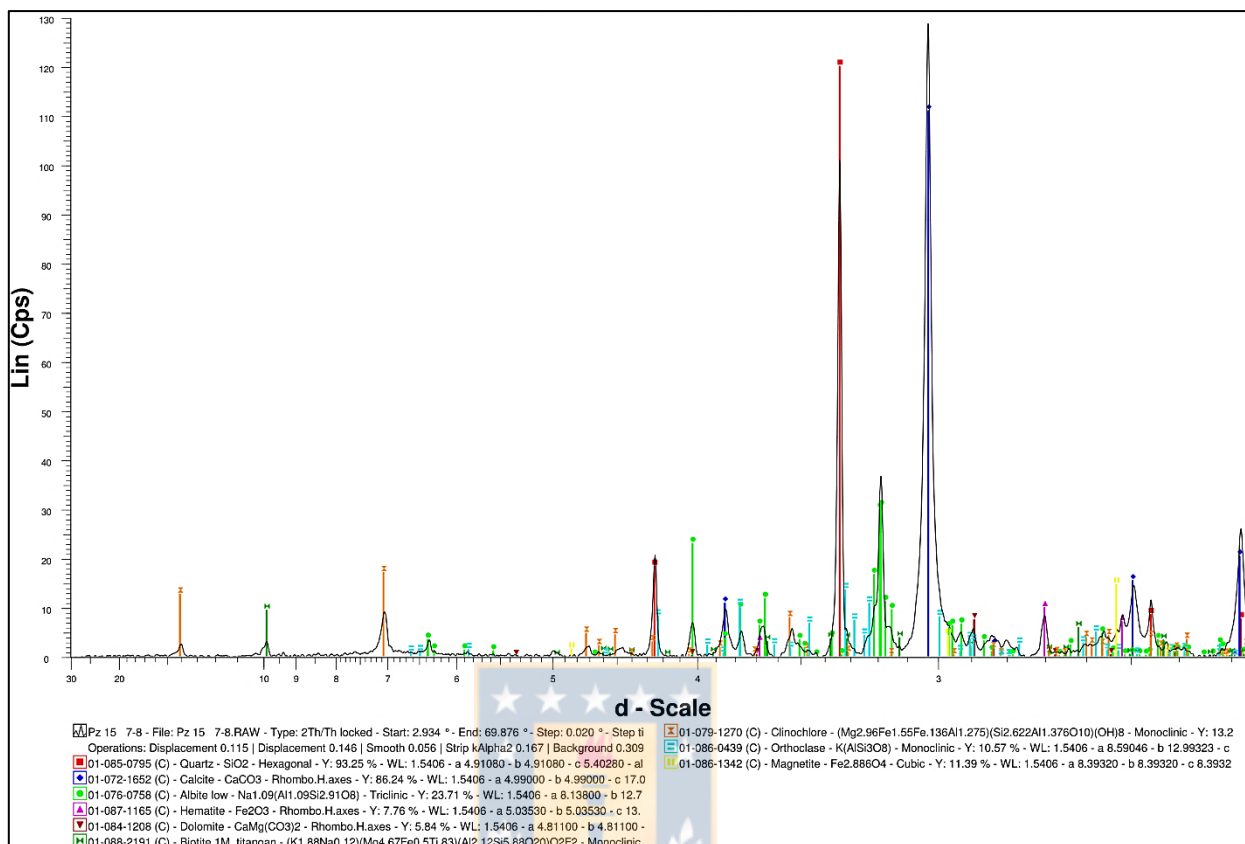


Pz 14: 9,0-10,0 (muestra total)

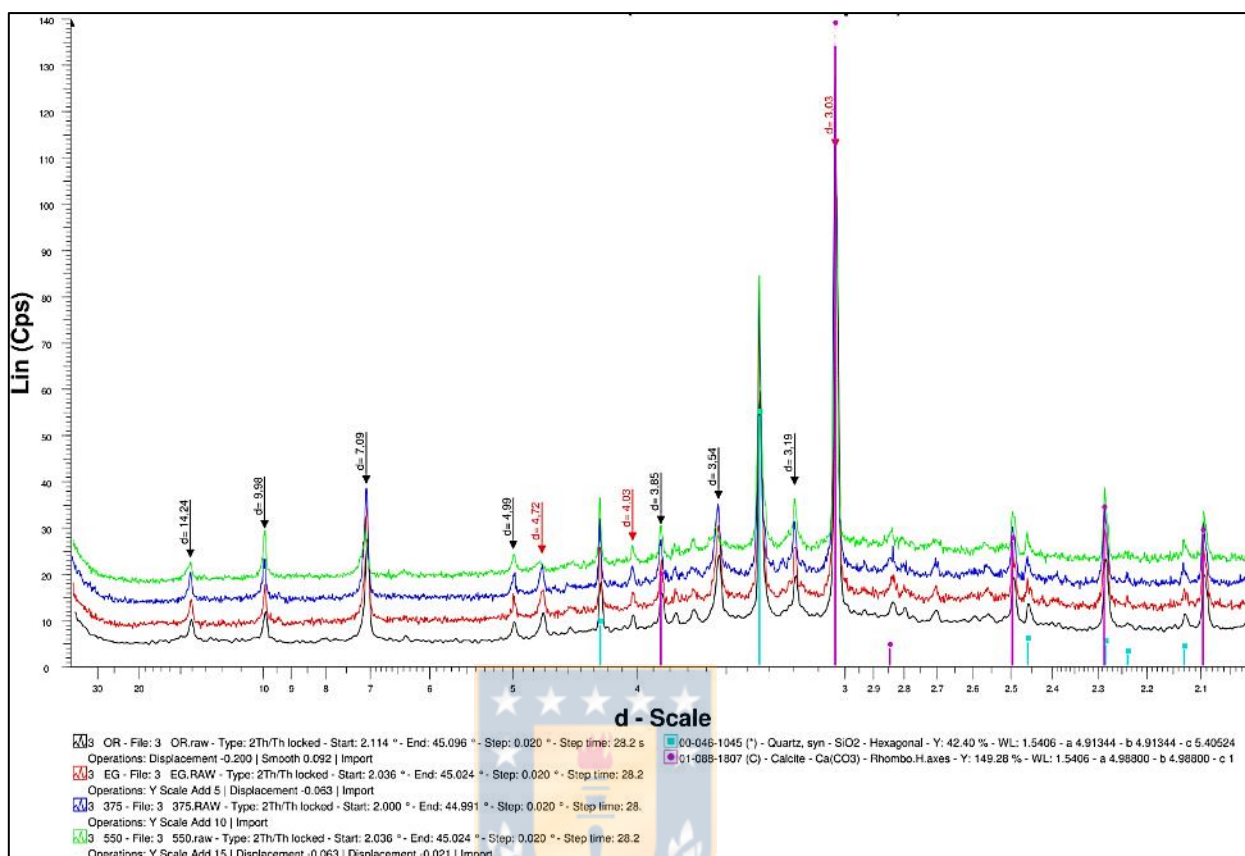


Pz 14: 9,0-10,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)

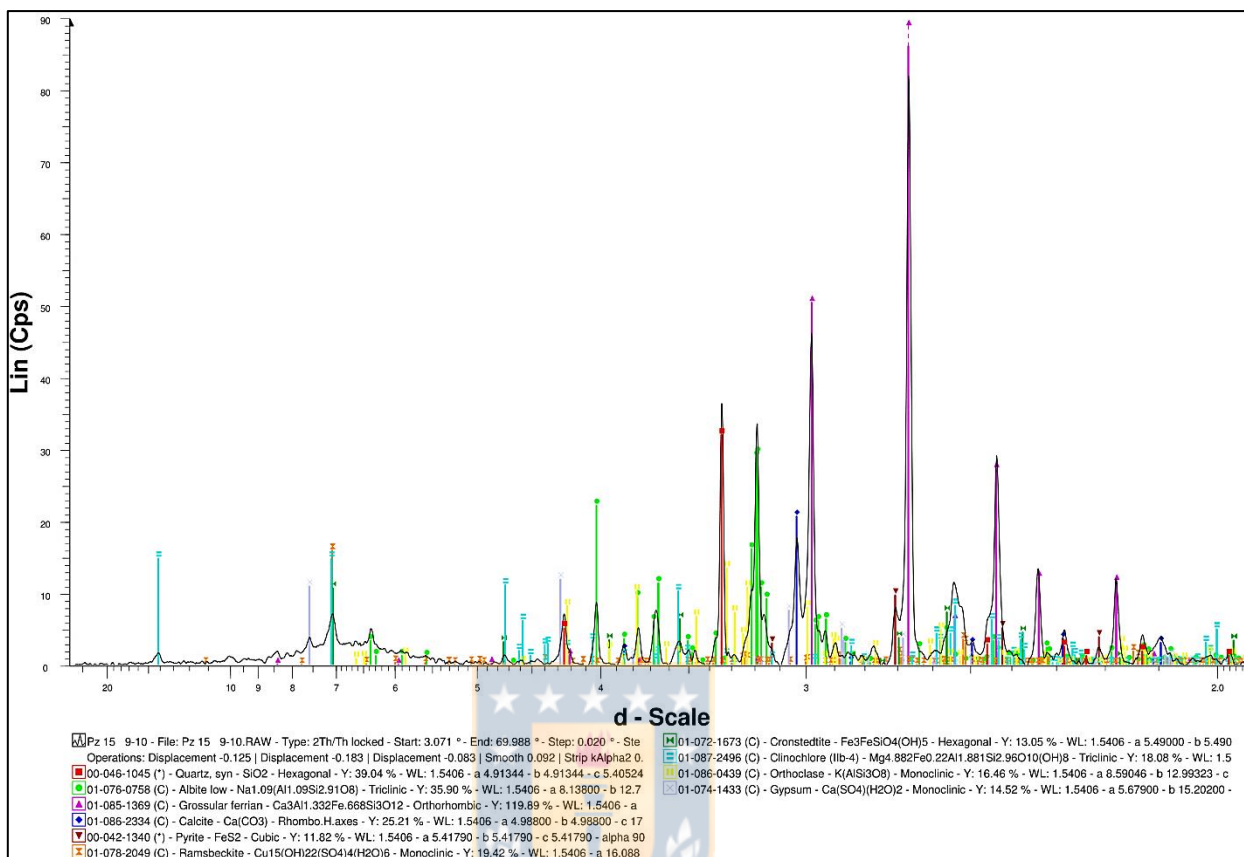


Pz 15: 7,0-8,0 (muestra total)

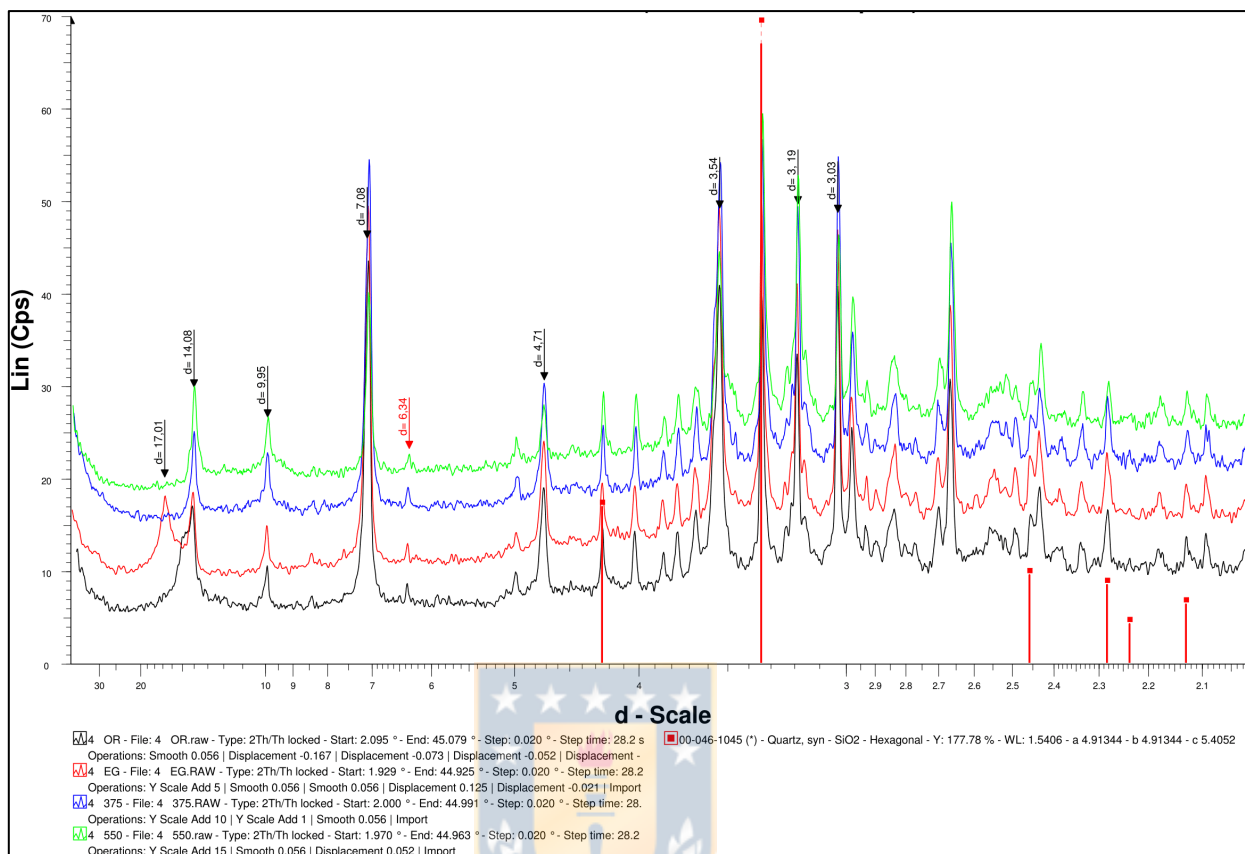
Pz 15: 7,0-8,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)



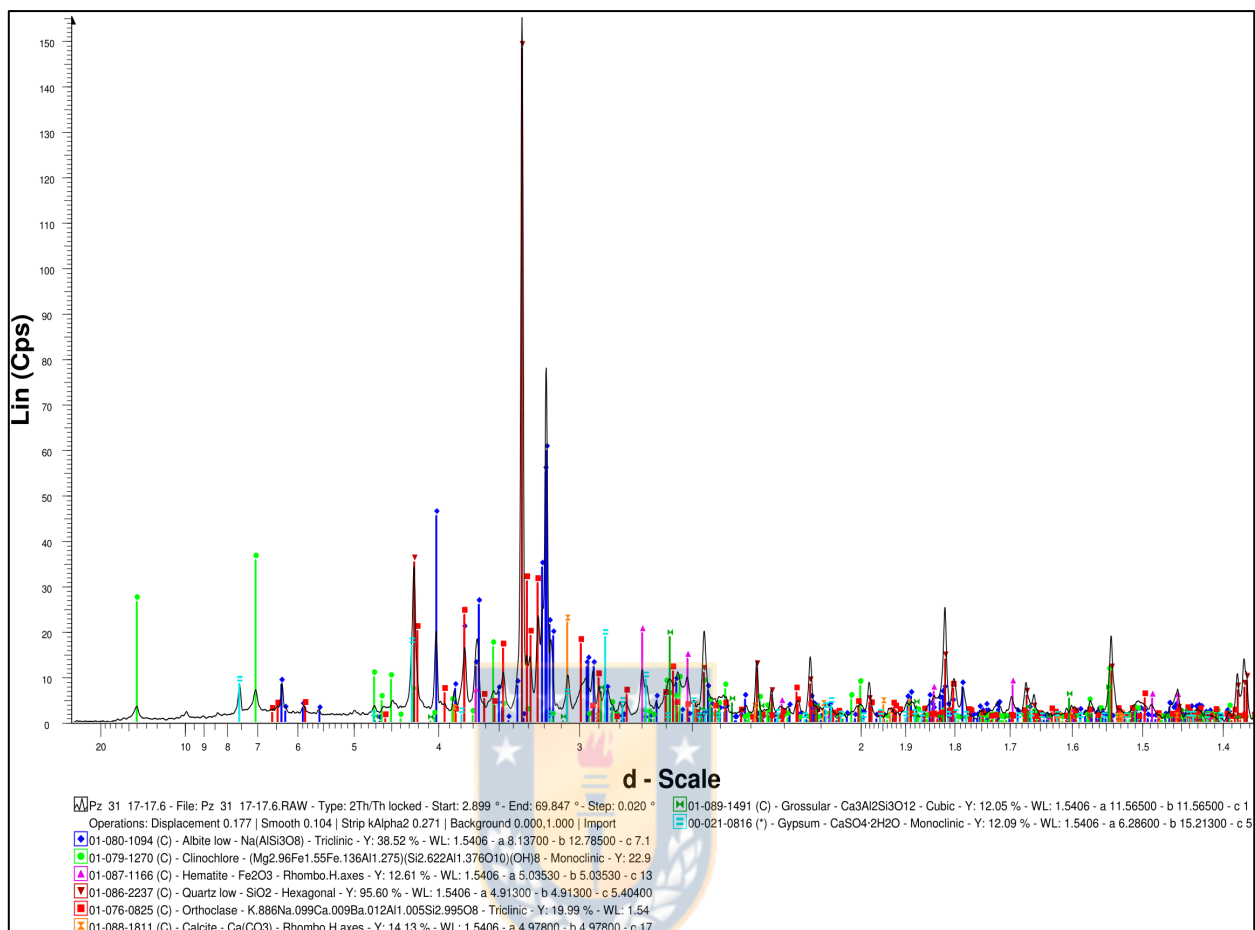
Pz 15: 9,0-10,0 (muestra total)



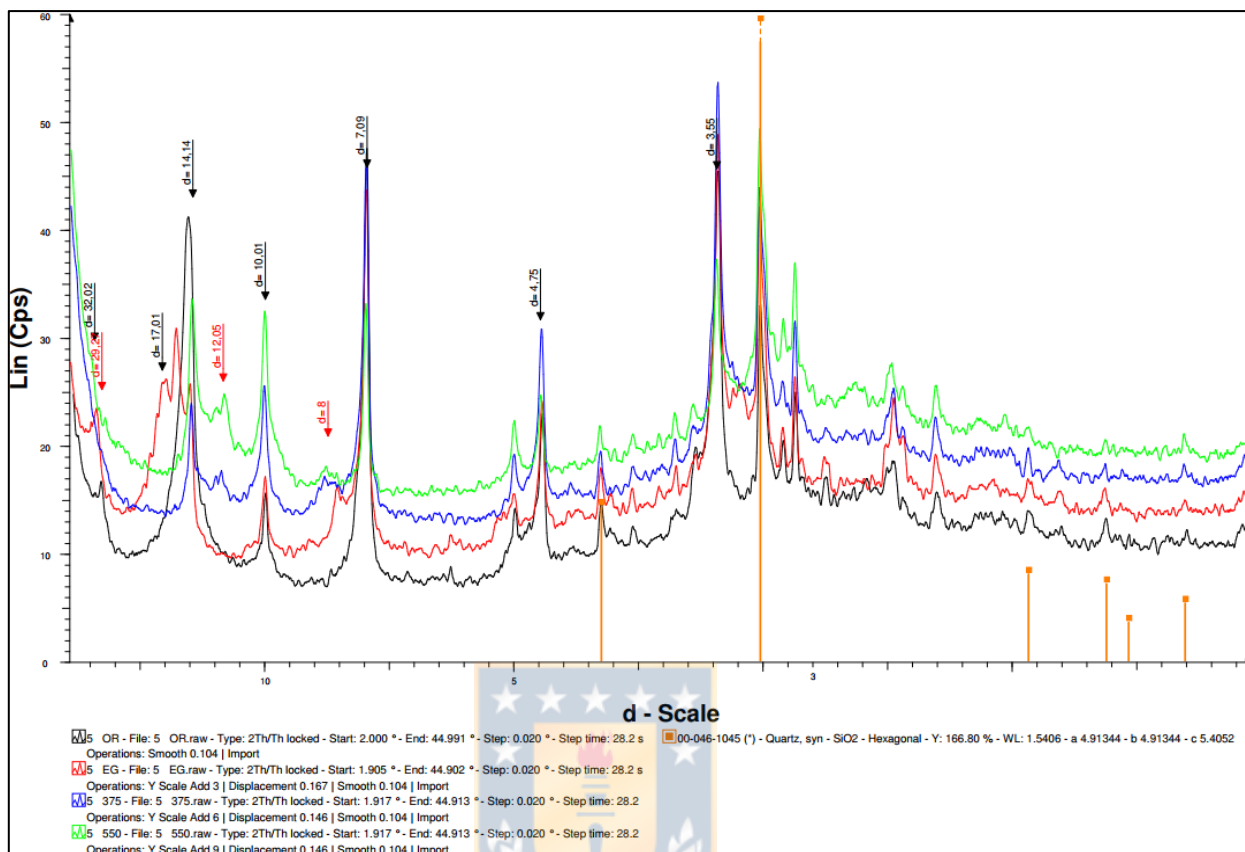
Pz 15: 9,0-10,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)

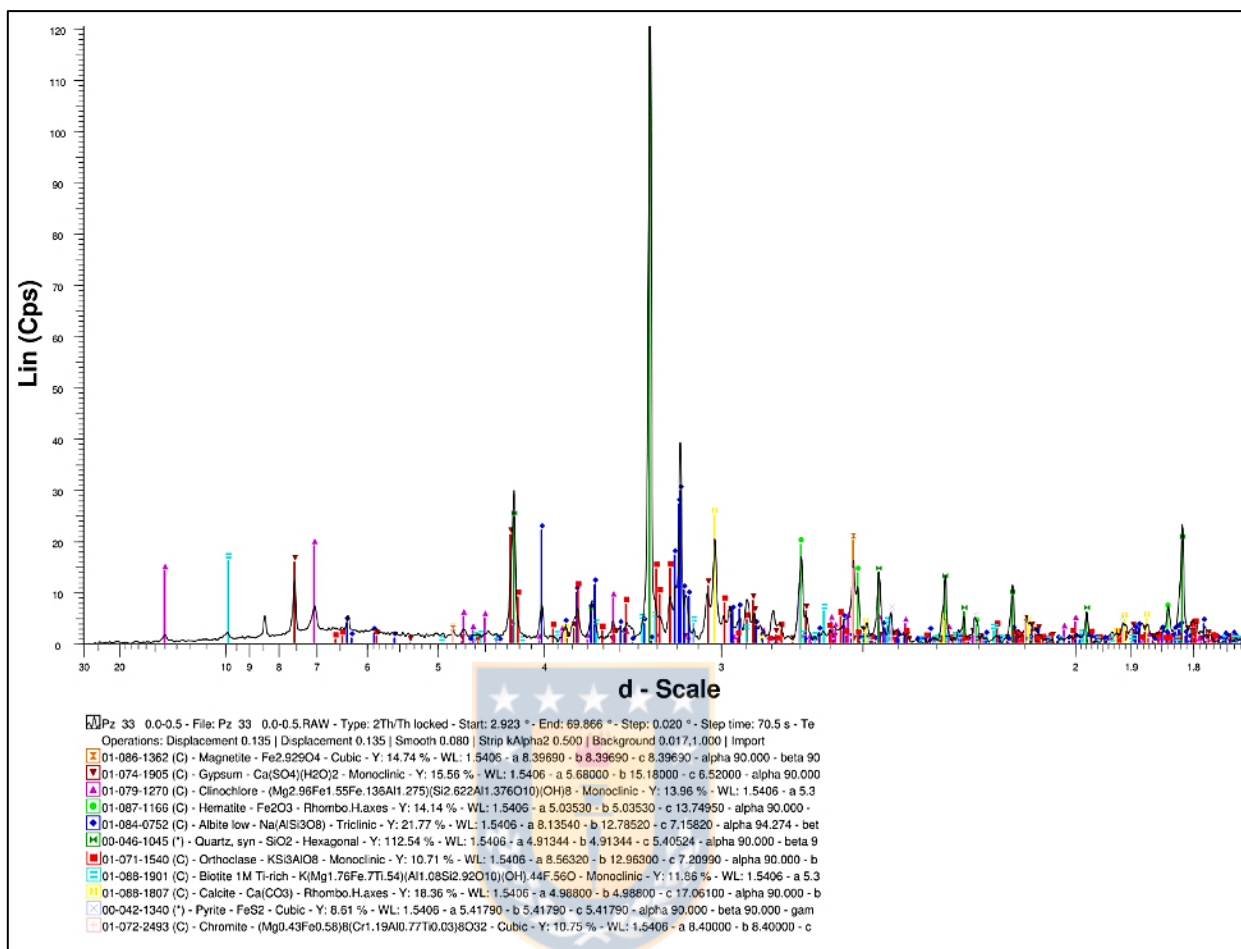


Pz 31: 17,0-17,6 (muestra total)

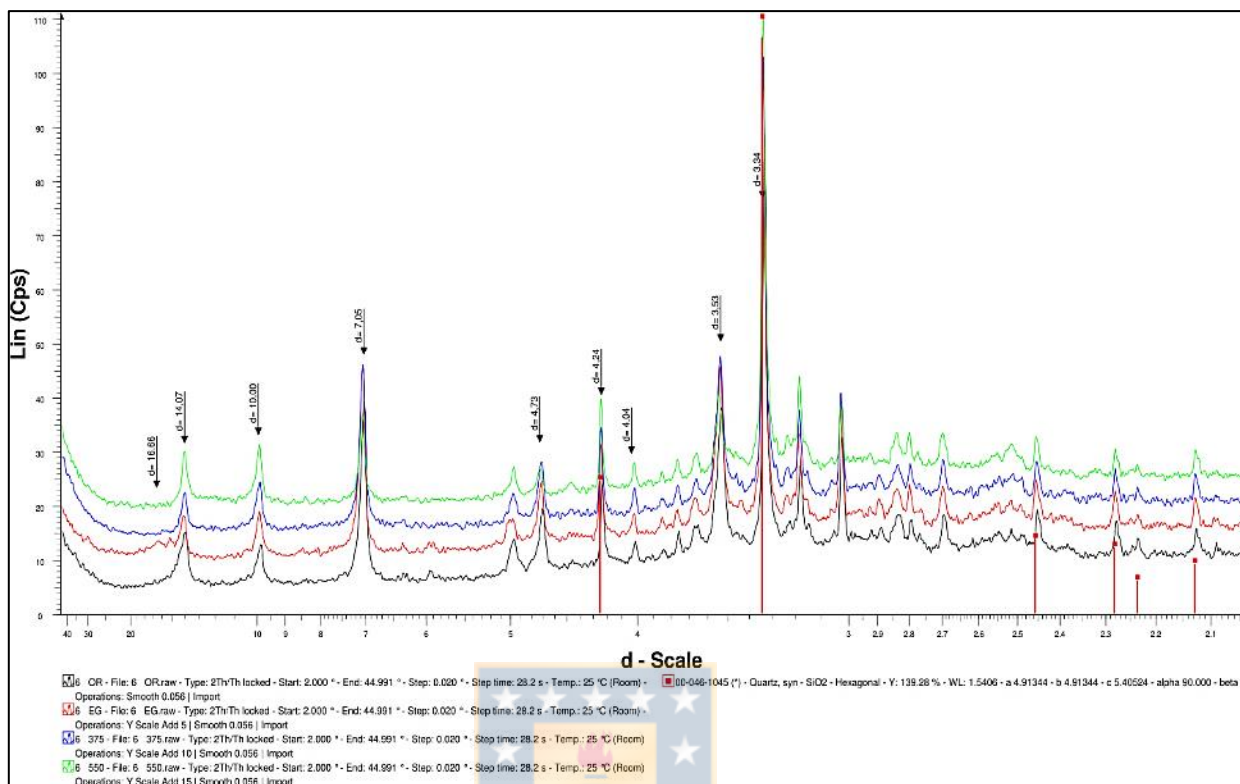


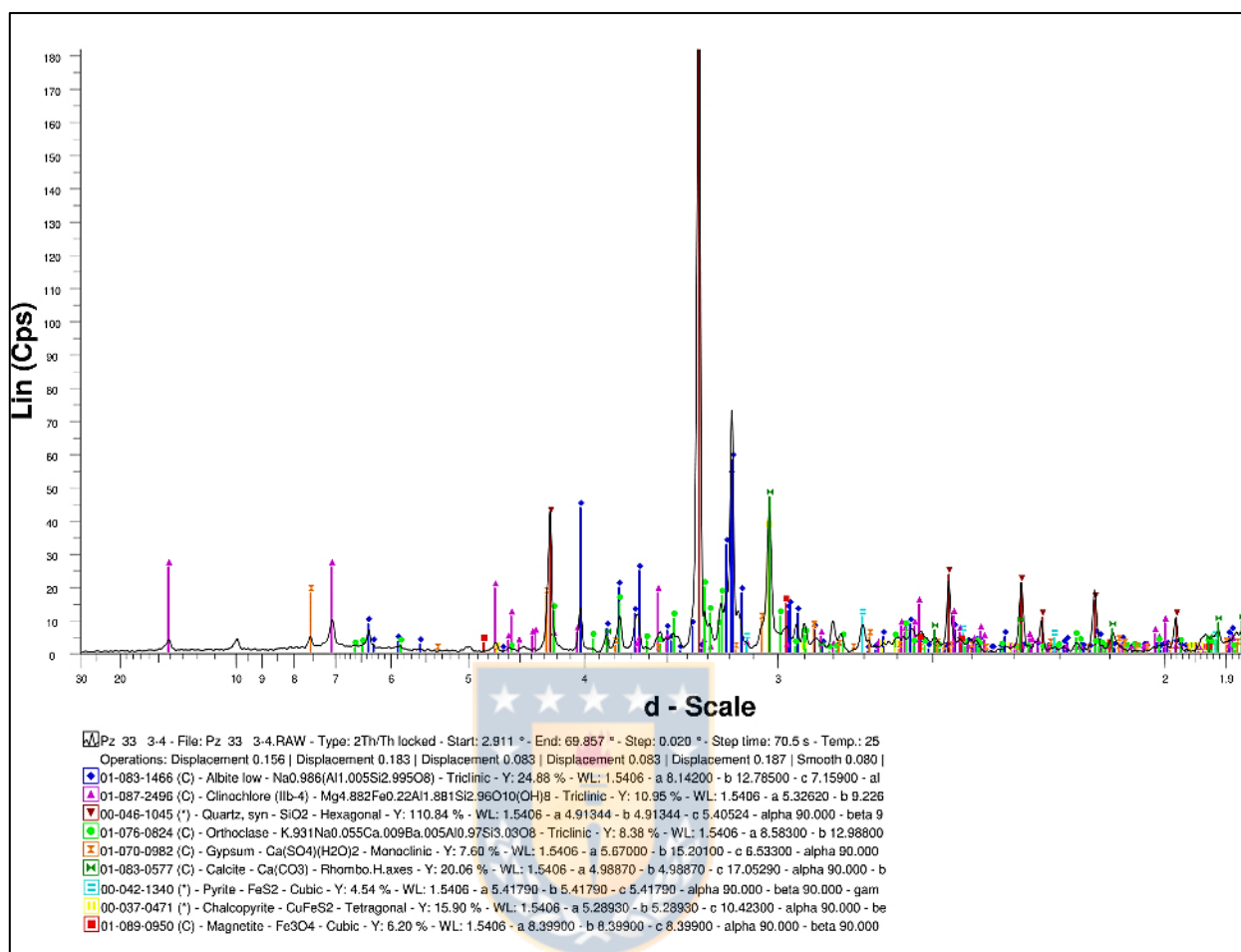
Pz 31: 17,0-17,6 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)



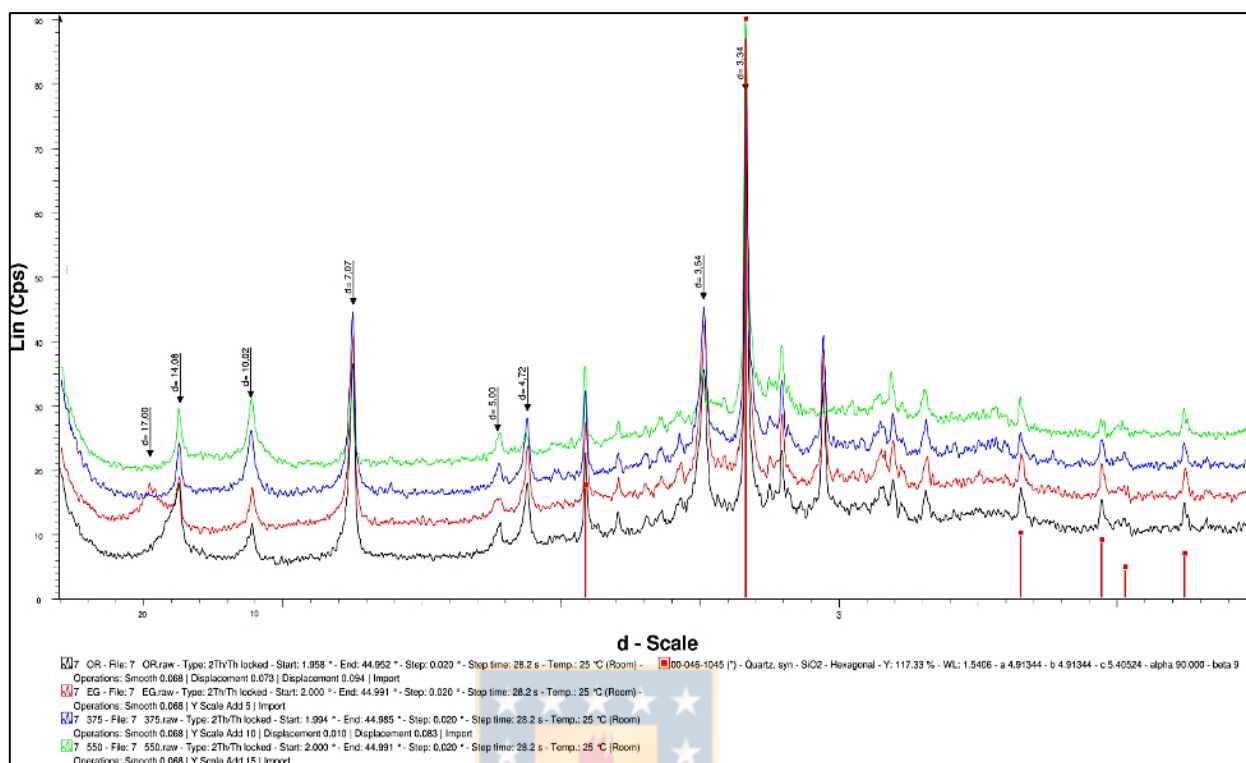
Pz 33: 0,0-0,5 (muestra total)

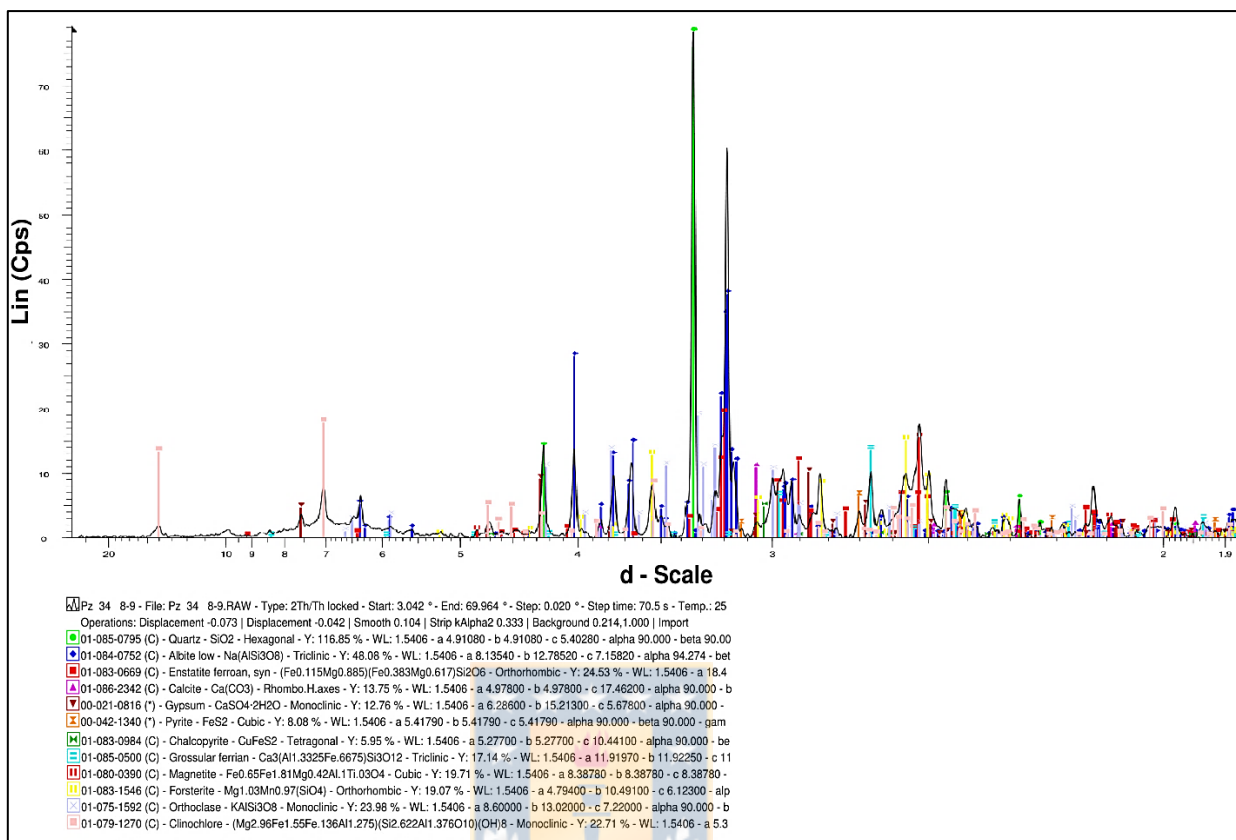
Pz 33: 0,0-0,5 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)



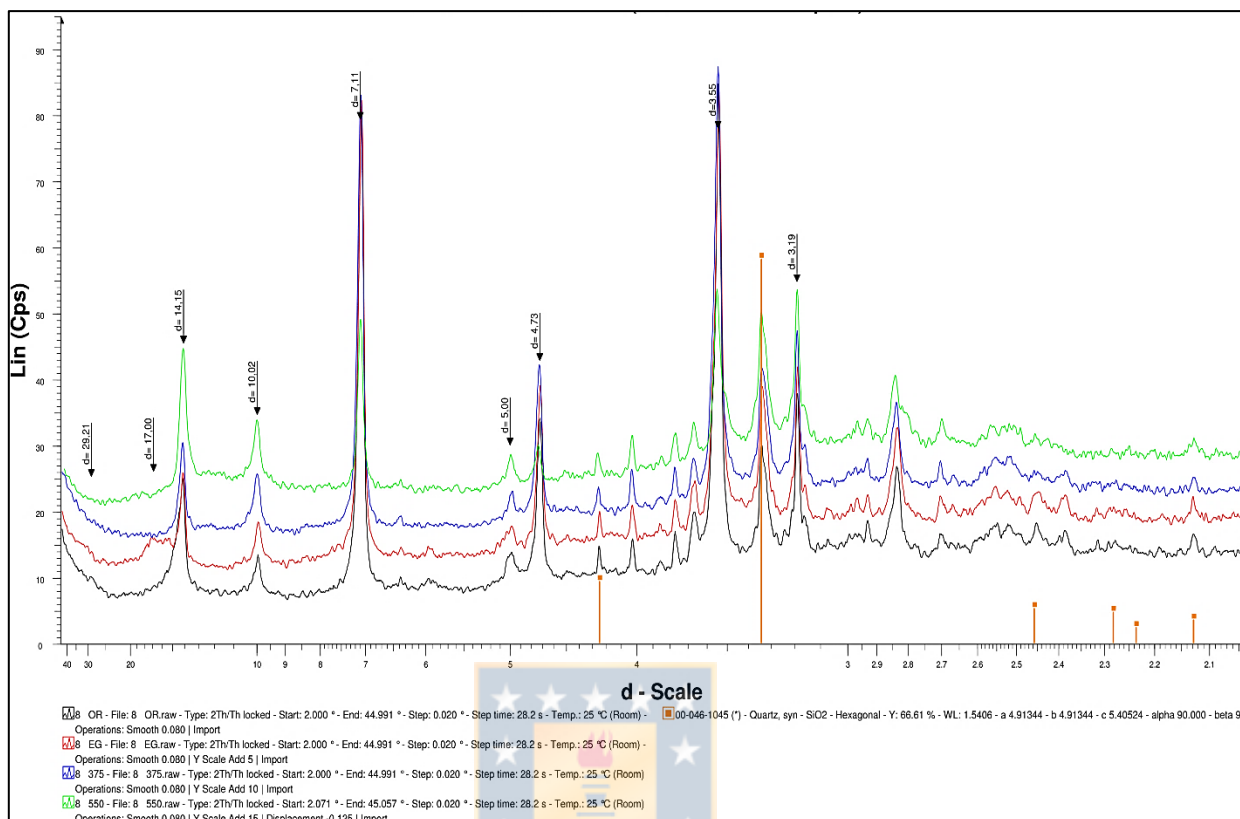
Pz 33: 3,0-4,0 (muestra total)

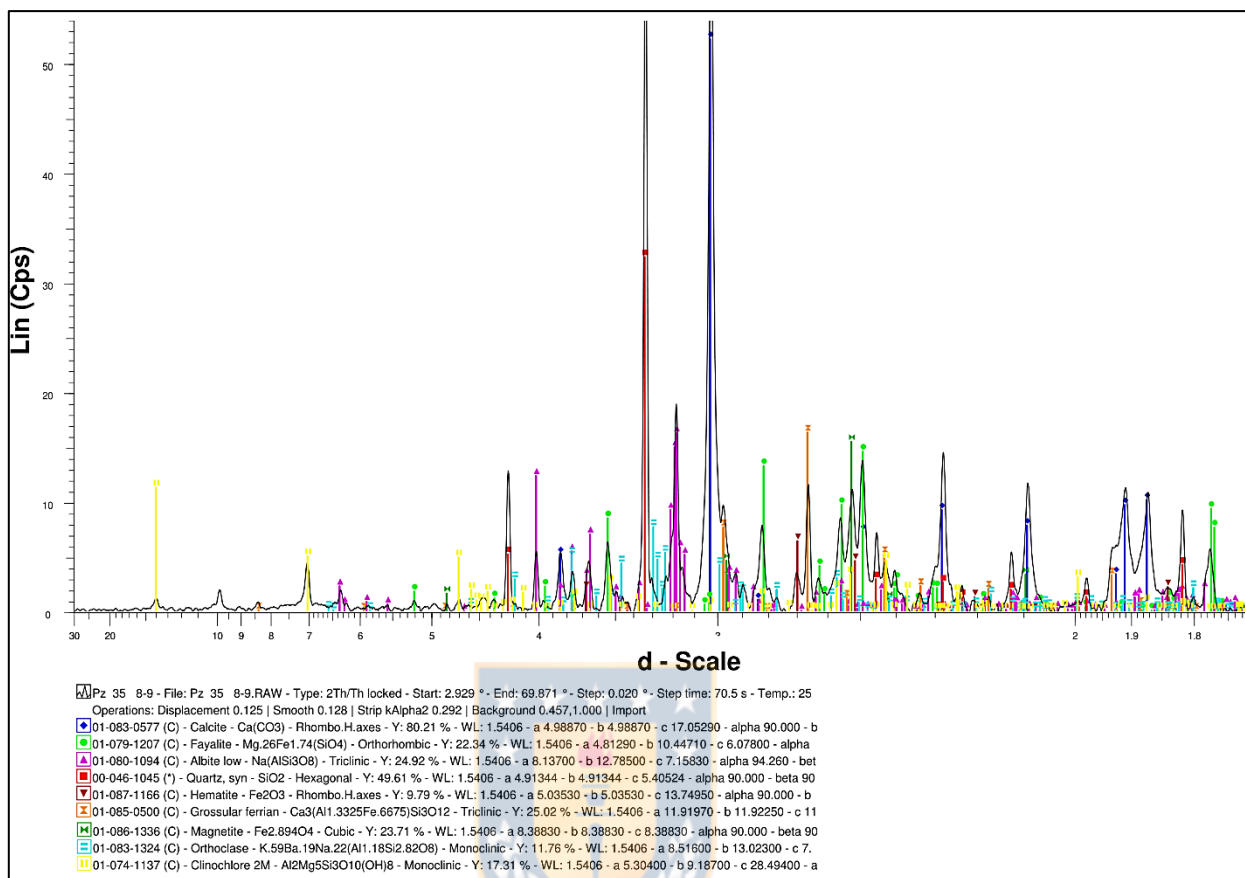
Pz 33: 3,0-4,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)



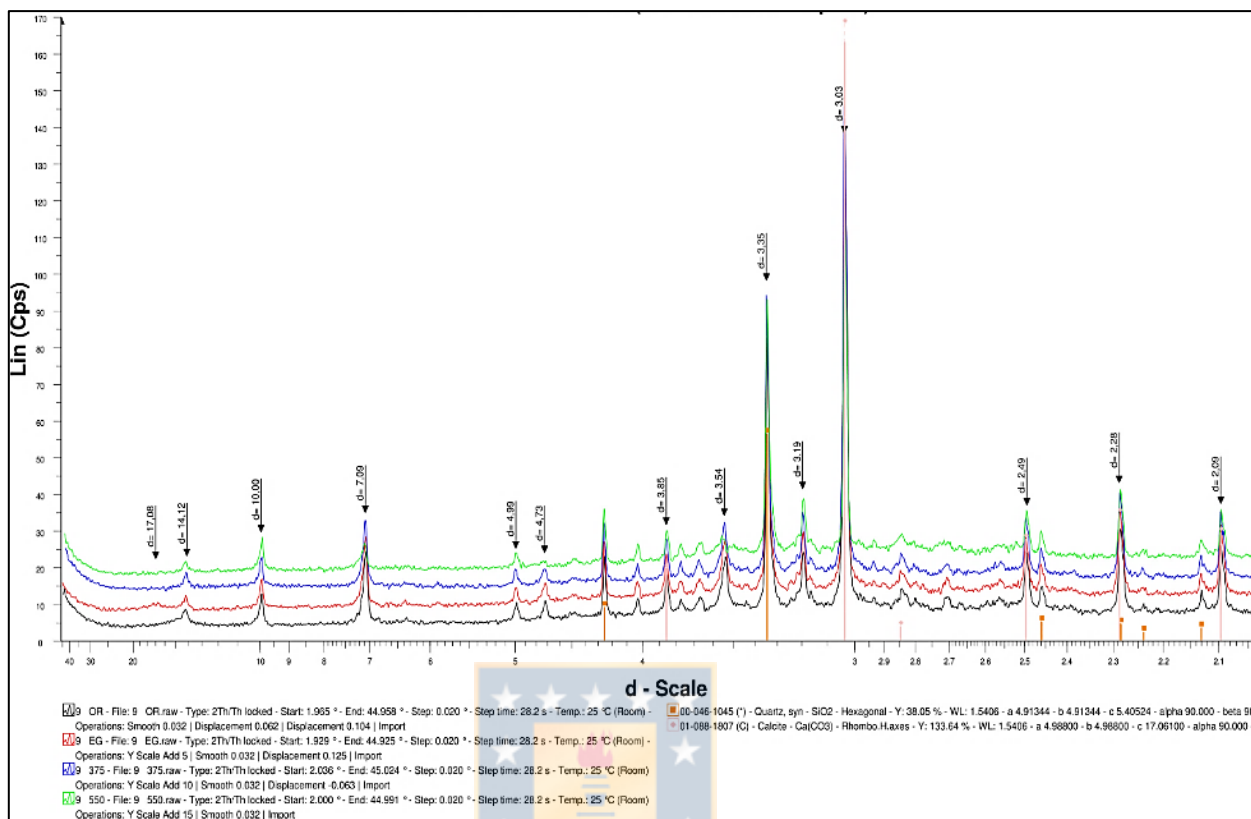
Pz 34: 8,0-9,0 (muestra total)

Pz 34: 8,0-9,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)



Pz 35: 8,0-9,0 (muestra total)

Pz 35: 8,0-9,0 (fracción argílica 0,45 - 2 μm)





ANEXO V

Análisis por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X

2018- 7-26 16:34

SQX Calculation Result							
Sample : PZ 13 1-2						Date analyzed : 2018- 7-26 16:24	
Application : F-U_Solid_N_099		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : PZ 13 1-2		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	F	0.198	mass%	0.10359	F -KA	0.0313	0.1845
2	Na2O	1.78	mass%	0.01870	Na-KA	5.8027	1.6625
3	MgO	1.43	mass%	0.01146	Mg-KA	10.6125	1.3357
4	Al2O3	7.76	mass%	0.00799	Al-KA	169.1959	7.2316
5	SiO2	51.7	mass%	0.01609	Si-KA	977.6210	48.1610
6	P2O5	2.40	mass%	0.00425	P -KA	66.0551	2.2393
7	SO3	2.67	mass%	0.00385	S -KA	62.0967	2.4848
8	Cl	0.0283	mass%	0.00300	Cl-KA	0.4296	0.0264
9	K2O	1.94	mass%	0.00465	K -KA	36.5107	1.8036
10	CaO	11.3	mass%	0.00681	Ca-KA	197.0813	10.5214
11	TiO2	0.380	mass%	0.01038	Ti-KA	2.0166	0.3543
12	V2O5	0.0225	mass%	0.00861	V -KA	0.2318	0.0210
13	Cr2O3	0.0652	mass%	0.00448	Cr-KA	1.2597	0.0607
14	MnO	0.243	mass%	0.00369	Mn-KA	7.9783	0.2262
15	Fe2O3	15.9	mass%	0.00678	Fe-KA	743.7190	14.8284
16	Co2O3	0.0173	mass%	0.00506	Co-KA	1.1983	0.0161
17	NiO	0.0064	mass%	0.00239	Ni-KA	0.4665	0.0059
18	CuO	1.38	mass%	0.00235	Cu-KA	130.0586	1.2831
19	ZnO	0.409	mass%	0.00209	Zn-KA	52.7378	0.3812
20	As2O3	0.0699	mass%	0.00189	As-KA	13.5287	0.0652
21	Rb2O	0.0053	mass%	0.00127	Rb-KA	2.2783	0.0050
22	SrO	0.0188	mass%	0.00126	Sr-KA	8.4912	0.0175
23	Y2O3	0.0024	mass%	0.00131	Y -KA	1.7883	0.0022
24	ZrO2	0.0099	mass%	0.00139	Zr-KA	6.9320	0.0093
25	MoO3	0.0404	mass%	0.00150	Mo-KA	23.4299	0.0377
26	CdO	0.0506	mass%	0.02399	Cd-KB1	4.7602	0.0471
27	Sb2O3	0.0185	mass%	0.00696	Sb-KA	0.3655	0.0172
28	BaO	0.0900	mass%	0.01757	Ba-KA	4.6114	0.0838
29	WO3	0.0886	mass%	0.00637	W -LA	3.3944	0.0825

Rigaku

2018- 8- 9 17:54

SQX Calculation Result							
Sample : PZ14 9-10						Date analyzed : 2018- 8- 9 17:43	
Application : F-U_Solid_N_075		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : PZ14 9-10		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	1.51	mass%	0.02055	Na-KA	4.5917	1.4644
2	MgO	3.20	mass%	0.01401	Mg-KA	22.1891	3.0990
3	Al2O3	9.80	mass%	0.00915	Al-KA	198.7072	9.5015
4	SiO2	35.3	mass%	0.01426	Si-KA	628.9673	34.2268
5	P2O5	0.496	mass%	0.00275	P -KA	14.9664	0.4812
6	SO3	2.97	mass%	0.00424	S -KA	76.5544	2.8805
7	Cl	0.0280	mass%	0.00305	Cl-KA	0.4939	0.0271
8	K2O	0.928	mass%	0.00403	K -KA	19.5653	0.8997
9	CaO	14.9	mass%	0.00763	Ca-KA	293.4147	14.4569
10	TiO2	0.496	mass%	0.01178	Ti-KA	2.7389	0.4812
11	V2O5	0.0236	mass%	0.00726	V -KA	0.2572	0.0229
12	Cr2O3	0.0790	mass%	0.00467	Cr-KA	1.5739	0.0766
13	MnO	0.790	mass%	0.00517	Mn-KA	25.1477	0.7662
14	Fe2O3	27.8	mass%	0.00948	Fe-KA	1228.6206	26.9467
15	Co2O3	0.0307	mass%	0.00693	Co-KA	1.9812	0.0298
16	NiO	0.0087	mass%	0.00266	Ni-KA	0.5089	0.0084
17	CuO	0.593	mass%	0.00258	Cu-KA	44.4580	0.5748
18	ZnO	0.421	mass%	0.00230	Zn-KA	42.9673	0.4087
19	As2O3	0.0721	mass%	0.01217	As-KB1	2.4160	0.0699
20	Rb2O	0.0031	mass%	0.00144	Rb-KA	1.0716	0.0030
21	SrO	0.0199	mass%	0.00147	Sr-KA	7.2375	0.0193
22	ZrO2	0.0144	mass%	0.00159	Zr-KA	7.0385	0.0139
23	MoO3	0.382	mass%	0.00911	Mo-KB1	39.2610	0.3704
24	CdO	0.0000	mass%	0.02839	Cd-KB1	2.9276	0.0000
25	Sb2O3	0.0000	mass%	0.00962	Sb-KA	0.2297	0.0000
26	BaO	0.0825	mass%	0.01993	Ba-KA	3.4167	0.0800
27	WO3	0.0274	mass%	0.00721	W -LA	0.8386	0.0266
28	PbO	0.0433	mass%	0.00427	Pb-LB1	4.5042	0.0420

Rigaku

2018- 8- 9 15:27

SQX Calculation Result							
Sample : PZ15 7-8		Date analyzed : 2018- 8- 9 15:16					
Application : F-U_Solid_N_062		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
Sample film corr. :				Matching library :			
File : PZ15 7-8				Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	F	0.0765	mass%	0.09400	F -KA	0.0100	0.0649
2	Na2O	1.60	mass%	0.01383	Na-KA	4.5716	1.3578
3	MgO	2.34	mass%	0.01109	Mg-KA	15.9276	1.9892
4	Al2O3	9.14	mass%	0.00801	Al-KA	183.3543	7.7641
5	SiO2	35.1	mass%	0.01252	Si-KA	614.4241	29.7711
6	P2O5	0.870	mass%	0.00259	P -KA	24.9331	0.7385
7	SO3	1.32	mass%	0.00314	S -KA	32.5082	1.1236
8	Cl	0.0200	mass%	0.00295	Cl-KA	0.3208	0.0170
9	K2O	1.67	mass%	0.00352	K -KA	32.8517	1.4160
10	CaO	35.0	mass%	0.01079	Ca-KA	577.4669	29.7095
11	TiO2	0.463	mass%	0.01262	Ti-KA	1.5555	0.3928
12	V2O5	0.0721	mass%	0.00982	V -KA	0.4383	0.0613
13	MnO	0.383	mass%	0.00451	Mn-KA	8.2882	0.3253
14	Fe2O3	11.0	mass%	0.00510	Fe-KA	342.7544	9.3037
15	Co2O3	0.0143	mass%	0.00509	Co-KA	0.6600	0.0121
16	NiO	0.0073	mass%	0.00269	Ni-KA	0.4253	0.0062
17	CuO	0.683	mass%	0.00262	Cu-KA	51.4336	0.5802
18	ZnO	0.0414	mass%	0.00223	Zn-KA	4.3080	0.0352
19	As2O3	0.0263	mass%	0.01196	As-KB1	0.9001	0.0223
20	Rb2O	0.0067	mass%	0.00146	Rb-KA	2.3945	0.0057
21	SrO	0.0289	mass%	0.00146	Sr-KA	10.8772	0.0245
22	ZrO2	0.0137	mass%	0.00163	Zr-KA	7.7045	0.0116
23	MoO3	0.0114	mass%	0.00172	Mo-KA	5.3661	0.0097
24	BaO	0.0832	mass%	0.01978	Ba-KA	3.6423	0.0706
25	PbO	0.133	mass%	0.00446	Pb-LB1	14.2615	0.1127

Rigaku

2018- 8- 9 15:49

SQX Calculation Result							
Sample : PZ15 9-10						Date analyzed : 2018- 8- 9 15:38	
Application : F-U_Solid_N_064		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : PZ15 9-10		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	2.64	mass%	0.01687	Na-KA	8.1901	2.4496
2	MgO	3.74	mass%	0.01297	Mg-KA	27.0493	3.4691
3	Al2O3	12.0	mass%	0.00959	Al-KA	249.5669	11.0803
4	SiO2	38.6	mass%	0.01420	Si-KA	685.7371	35.7387
5	P2O5	0.574	mass%	0.00259	P -KA	16.5799	0.5321
6	SO3	3.00	mass%	0.00347	S -KA	74.3938	2.7834
7	Cl	0.0351	mass%	0.00295	Cl-KA	0.5617	0.0325
8	K2O	0.807	mass%	0.00309	K -KA	16.1956	0.7477
9	CaO	19.3	mass%	0.00818	Ca-KA	356.6248	17.8706
10	TiO2	0.552	mass%	0.00941	Ti-KA	2.6384	0.5116
11	V2O5	0.0395	mass%	0.00824	V -KA	0.3559	0.0366
12	MnO	1.10	mass%	0.00467	Mn-KA	32.2884	1.0189
13	Fe2O3	17.1	mass%	0.00766	Fe-KA	715.0426	15.8291
14	Co2O3	0.0196	mass%	0.00565	Co-KA	1.1934	0.0182
15	NiO	0.0062	mass%	0.00250	Ni-KA	0.4045	0.0057
16	CuO	0.395	mass%	0.00224	Cu-KA	33.5861	0.3664
17	ZnO	0.0967	mass%	0.00203	Zn-KA	11.2201	0.0896
18	Ga2O3	0.0034	mass%	0.00215	Ga-KA	0.4459	0.0031
19	As2O3	0.0279	mass%	0.01076	As-KB1	1.0741	0.0259
20	Rb2O	0.0024	mass%	0.00130	Rb-KA	0.9480	0.0022
21	SrO	0.0109	mass%	0.00134	Sr-KA	4.6069	0.0101
22	Y2O3	0.0017	mass%	0.00134	Y -KA	1.0776	0.0016
23	ZrO2	0.0128	mass%	0.00141	Zr-KA	6.8635	0.0119
24	MoO3	0.0096	mass%	0.00154	Mo-KA	4.5236	0.0089
25	WO3	0.0220	mass%	0.00625	W -LA	0.7541	0.0204
26	PbO	0.0246	mass%	0.00383	Pb-LB1	2.9753	0.0228

Rigaku

2018- 8-20 09:11

SQX Calculation Result							
Sample : PZ31 17-17.6		Date analyzed : 2018- 8-20 09:00					
Application : F-U_Solid_N_014		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
Sample film corr. :				Matching library :			
File : PZ31 17-17.6				Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	2.89	mass%	0.01375	Na-KA	9.6284	2.5864
2	MgO	3.52	mass%	0.01259	Mg-KA	27.0811	3.1510
3	Al2O3	14.3	mass%	0.00994	Al-KA	312.4486	12.7725
4	SiO2	54.8	mass%	0.01658	Si-KA	968.9956	49.0444
5	P2O5	0.927	mass%	0.00317	P -KA	23.5866	0.8301
6	SO3	3.37	mass%	0.00412	S -KA	73.3714	3.0209
7	Cl	0.0218	mass%	0.00302	Cl-KA	0.3057	0.0195
8	K2O	3.42	mass%	0.00468	K -KA	59.0759	3.0637
9	CaO	3.83	mass%	0.00469	Ca-KA	61.1677	3.4272
10	TiO2	0.697	mass%	0.00966	Ti-KA	3.9524	0.6243
11	V2O5	0.0525	mass%	0.00699	V -KA	0.5646	0.0470
12	MnO	0.144	mass%	0.00356	Mn-KA	5.1552	0.1289
13	Fe2O3	11.4	mass%	0.00550	Fe-KA	588.5421	10.2412
14	Co2O3	0.0153	mass%	0.00416	Co-KA	1.1760	0.0137
15	CuO	0.456	mass%	0.00206	Cu-KA	51.0451	0.4081
16	ZnO	0.0138	mass%	0.00169	Zn-KA	2.1613	0.0124
17	Ga2O3	0.0020	mass%	0.00180	Ga-KA	0.3631	0.0018
18	Rb2O	0.0113	mass%	0.00107	Rb-KA	6.0188	0.0101
19	SrO	0.0136	mass%	0.00109	Sr-KA	7.6910	0.0122
20	Y2O3	0.0019	mass%	0.00117	Y -KA	3.1498	0.0017
21	ZrO2	0.0134	mass%	0.00649	Zr-KB1	1.9382	0.0120
22	BaO	0.0517	mass%	0.02169	Ba-LA	0.1388	0.0463
23	WO3	0.0512	mass%	0.00534	W -LA	2.3227	0.0458
24	PbO	0.0329	mass%	0.00308	Pb-LA	3.9763	0.0294

Rigaku

2018- 8-10 09:24

SQX Calculation Result							
Sample : PZ33 0.0-0.5		Date analyzed : 2018- 8-10 09:13					
Application : F-U_Solid_N_078		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
Sample film corr. :				Matching library :			
File : PZ33 0.0-0.5				Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	F	0.191	mass%	0.10358	F -KA	0.0310	0.1807
2	Na2O	1.87	mass%	0.01552	Na-KA	5.8299	1.7660
3	MgO	2.31	mass%	0.01300	Mg-KA	16.9041	2.1840
4	Al2O3	9.09	mass%	0.00856	Al-KA	194.3478	8.5949
5	SiO2	44.8	mass%	0.01533	Si-KA	828.1890	42.3229
6	P2O5	2.06	mass%	0.00415	P -KA	58.6783	1.9465
7	SO3	6.26	mass%	0.00468	S -KA	150.7862	5.9169
8	Cl	0.0688	mass%	0.00332	Cl-KA	1.0490	0.0651
9	K2O	2.01	mass%	0.00395	K -KA	38.2852	1.8974
10	CaO	9.96	mass%	0.00655	Ca-KA	177.3440	9.4195
11	TiO2	0.395	mass%	0.00967	Ti-KA	2.1929	0.3731
12	V2O5	0.0393	mass%	0.00756	V -KA	0.4042	0.0372
13	Cr2O3	0.0104	mass%	0.00480	Cr-KA	0.2239	0.0098
14	MnO	0.253	mass%	0.00388	Mn-KA	8.5846	0.2397
15	Fe2O3	18.4	mass%	0.00746	Fe-KA	882.1807	17.3993
16	Co2O3	0.0147	mass%	0.00547	Co-KA	1.0422	0.0139
17	NiO	0.0052	mass%	0.00255	Ni-KA	0.3661	0.0049
18	CuO	1.96	mass%	0.00262	Cu-KA	179.6791	1.8531
19	ZnO	0.0708	mass%	0.00217	Zn-KA	8.9985	0.0669
20	GeO2	0.0017	mass%	0.00241	Ge-KA	0.5757	0.0017
21	As2O3	0.0789	mass%	0.01108	As-KB1	3.1316	0.0746
22	SeO2	0.0020	mass%	0.00192	Se-KA	0.4696	0.0019
23	Rb2O	0.0058	mass%	0.00125	Rb-KA	2.3808	0.0055
24	SrO	0.0129	mass%	0.00128	Sr-KA	5.6111	0.0122
25	Y2O3	0.0026	mass%	0.00133	Y -KA	1.9302	0.0025
26	ZrO2	0.0094	mass%	0.00139	Zr-KA	5.4863	0.0089
27	MoO3	0.0033	mass%	0.00152	Mo-KA	2.0205	0.0032
28	Sb2O3	0.0386	mass%	0.00606	Sb-KA	0.4887	0.0365
29	BaO	0.0558	mass%	0.01780	Ba-KA	2.7852	0.0527
30	WO3	0.0378	mass%	0.00679	W -LA	1.4062	0.0358
31	PbO	0.0315	mass%	0.00399	Pb-LB1	3.9160	0.0298

2018- 8-10 10:07

SQX Calculation Result							
Sample : PZ33 3-4		Date analyzed : 2018- 8-10 09:56					
Application : F-U_Solid_N_082		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
Sample film corr. :				Matching library :			
File : PZ33 3-4				Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	F	0.229	mass%	0.09105	F -KA	0.0359	0.2118
2	Na2O	2.41	mass%	0.01561	Na-KA	7.8774	2.2262
3	MgO	2.43	mass%	0.01240	Mg-KA	18.3314	2.2408
4	Al2O3	10.3	mass%	0.00886	Al-KA	225.8814	9.5231
5	SiO2	53.0	mass%	0.01604	Si-KA	978.7457	48.9384
6	P2O5	2.32	mass%	0.00435	P -KA	61.9763	2.1411
7	SO3	4.09	mass%	0.00442	S -KA	92.5974	3.7807
8	Cl	0.0187	mass%	0.00302	Cl-KA	0.2713	0.0172
9	K2O	2.23	mass%	0.00384	K -KA	39.9813	2.0575
10	CaO	8.73	mass%	0.00622	Ca-KA	146.4424	8.0622
11	TiO2	0.553	mass%	0.01208	Ti-KA	2.9791	0.5110
12	V2O5	0.0365	mass%	0.00741	V -KA	0.3767	0.0337
13	Cr2O3	0.0086	mass%	0.00447	Cr-KA	0.2153	0.0079
14	MnO	0.173	mass%	0.00337	Mn-KA	6.0213	0.1595
15	Fe2O3	9.06	mass%	0.00547	Fe-KA	457.1484	8.3696
16	Co2O3	0.0113	mass%	0.00386	Co-KA	0.8518	0.0105
17	NiO	0.0052	mass%	0.00224	Ni-KA	0.4632	0.0048
18	CuO	4.11	mass%	0.00245	Cu-KA	464.7221	3.7992
19	ZnO	0.0535	mass%	0.00203	Zn-KA	8.6978	0.0494
20	Ga2O3	0.0021	mass%	0.00194	Ga-KA	0.3401	0.0019
21	As2O3	0.0495	mass%	0.00999	As-KB1	2.2602	0.0458
22	Rb2O	0.0065	mass%	0.00115	Rb-KA	3.0955	0.0060
23	SrO	0.0147	mass%	0.00118	Sr-KA	7.3853	0.0136
24	Y2O3	0.0016	mass%	0.00125	Y -KA	1.7981	0.0015
25	ZrO2	0.0128	mass%	0.00127	Zr-KA	8.5819	0.0118
26	MoO3	0.0074	mass%	0.00137	Mo-KA	4.1645	0.0068
27	BaO	0.0654	mass%	0.01665	Ba-KA	3.7236	0.0604
28	WO3	0.0362	mass%	0.00622	W -LA	1.6677	0.0335
29	PbO	0.0308	mass%	0.00352	Pb-LB1	4.4047	0.0285

Rigaku

2018- 8-21 12:23

SQX Calculation Result

Sample : PZ34 08-9
 Application : F-U_Solid_N_007 Sample type : Oxide Powder
 Date analyzed : 2018- 8-21 12:12
 Balance :
 Matching library :
 Sample film corr. :
 Impurity corr. :
 File : PZ34 08-9

No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	3.96	mass%	0.02221	Na-KA	12.8664	3.7947
2	MgO	3.25	mass%	0.01377	Mg-KA	23.7527	3.1106
3	Al2O3	13.3	mass%	0.01035	Al-KA	280.9654	12.7412
4	SiO2	47.3	mass%	0.01625	Si-KA	835.7008	45.3074
5	P2O5	0.314	mass%	0.00233	P -KA	8.5825	0.3004
6	SO3	2.08	mass%	0.00370	S -KA	49.0370	1.9973
7	Cl	0.0168	mass%	0.00310	Cl-KA	0.2602	0.0161
8	K2O	1.37	mass%	0.00335	K -KA	26.6548	1.3155
9	CaO	4.86	mass%	0.00488	Ca-KA	91.4350	4.6594
10	TiO2	0.562	mass%	0.01031	Ti-KA	3.6335	0.5381
11	V2O5	0.0392	mass%	0.00772	V -KA	0.4824	0.0375
12	Cr2O3	0.0839	mass%	0.00448	Cr-KA	1.9822	0.0804
13	MnO	0.243	mass%	0.00373	Mn-KA	9.2760	0.2324
14	Fe2O3	20.9	mass%	0.00746	Fe-KA	1118.0520	20.0400
15	Co2O3	0.0202	mass%	0.00542	Co-KA	1.5997	0.0193
16	NiO	0.0059	mass%	0.00227	Ni-KA	0.4335	0.0056
17	CuO	0.893	mass%	0.00245	Cu-KA	84.4899	0.8560
18	ZnO	0.443	mass%	0.00201	Zn-KA	57.0909	0.4249
19	As2O3	0.0441	mass%	0.01025	As-KB1	1.8273	0.0422
20	Rb2O	0.0050	mass%	0.00122	Rb-KA	2.1596	0.0048
21	SrO	0.0195	mass%	0.00124	Sr-KA	8.8670	0.0187
22	Y2O3	0.0024	mass%	0.00128	Y -KA	1.9608	0.0023
23	ZrO2	0.0123	mass%	0.00137	Zr-KA	7.8182	0.0118
24	MoO3	0.0386	mass%	0.00146	Mo-KA	22.0903	0.0370
25	Sb2O3	0.0458	mass%	0.00566	Sb-KA	0.6024	0.0439
26	BaO	0.0949	mass%	0.01722	Ba-KA	4.8859	0.0909
27	WO3	0.0378	mass%	0.00643	W -LA	1.4538	0.0362
28	PbO	0.0475	mass%	0.00368	Pb-LB1	6.1667	0.0455

2018- 8-20 15:20

SQX Calculation Result							
Sample : PZ35 08-9		Date analyzed : 2018- 8-20 15:10					
Application : F-U_Solid_N_024		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
Sample film corr. :				Matching library :			
File : PZ35 08-9				Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	1.64	mass%	0.02014	Na-KA	4.9763	1.4861
2	MgO	2.13	mass%	0.01214	Mg-KA	14.4961	1.9289
3	Al2O3	9.15	mass%	0.00843	Al-KA	184.4056	8.3040
4	SiO2	36.3	mass%	0.01361	Si-KA	642.5649	32.9585
5	P2O5	0.694	mass%	0.00270	P -KA	20.1706	0.6292
6	SO3	1.52	mass%	0.00336	S -KA	37.8389	1.3755
7	Cl	0.0165	mass%	0.00300	Cl-KA	0.2713	0.0149
8	K2O	1.56	mass%	0.00372	K -KA	31.4603	1.4117
9	CaO	25.0	mass%	0.00930	Ca-KA	443.9523	22.6496
10	TiO2	0.533	mass%	0.01142	Ti-KA	2.2460	0.4835
11	V2O5	0.0581	mass%	0.00861	V -KA	0.4523	0.0527
12	Cr2O3	0.0574	mass%	0.00574	Cr-KA	0.8892	0.0520
13	MnO	0.427	mass%	0.00484	Mn-KA	11.0239	0.3876
14	Fe2O3	19.1	mass%	0.00808	Fe-KA	698.7871	17.3009
15	Co2O3	0.0166	mass%	0.00622	Co-KA	0.8989	0.0151
16	NiO	0.0072	mass%	0.00281	Ni-KA	0.4212	0.0066
17	CuO	0.852	mass%	0.00285	Cu-KA	63.7650	0.7728
18	ZnO	0.449	mass%	0.00236	Zn-KA	45.7498	0.4071
19	As2O3	0.0437	mass%	0.01246	As-KB1	1.4733	0.0396
20	Rb2O	0.0064	mass%	0.00151	Rb-KA	2.1813	0.0058
21	SrO	0.0265	mass%	0.00154	Sr-KA	9.5907	0.0240
22	ZrO2	0.0129	mass%	0.00166	Zr-KA	6.8520	0.0117
23	MoO3	0.0547	mass%	0.00177	Mo-KA	25.1625	0.0496
24	CdO	0.0000	mass%	0.03062	Cd-KB1	2.8331	0.0000
25	Sb2O3	0.0000	mass%	0.01056	Sb-KA	0.2673	0.0000
26	BaO	0.192	mass%	0.03894	Ba-LA	0.3838	0.1745
27	WO3	0.0333	mass%	0.00762	W -LA	1.0183	0.0302
28	PbO	0.164	mass%	0.00450	Pb-LB1	16.9876	0.1486
29	ThO2	0.0000	mass%	0.00416	Th-LA	0.8957	0.0000



ANEXO VI

Evaluación del riesgo para la salud humana

Ingesta Accidental

$$\text{Dosis} = \frac{C_{\text{suelo}} \times \text{EF} \times \text{FI} \times \text{ED} \times \text{IR}_{\text{adulto,niño}} \times \text{CF}_1}{\text{BW}_{\text{adulto,niño}} \times \text{AT} \times \text{CF}_2}$$

- C_{suelo} es la concentración del elemento (mg/kg).
- EF es la frecuencia de exposición (días/año).
- FI es la fracción de ingestión proveniente de la fuente contaminada (adimensional).
- ED es la duración de la exposición (años).
- IR es la tasa de ingestión de suelo (mg/día).
- CF_1 es el factor de conversión para la concentración del elemento (kg/mg).
- CF_2 es el factor de conversión para el tiempo de exposición (días/año).
- BW es el peso corporal de referencia de las personas (kg).
- AT es el tiempo de promediación (años), pudiendo ser 70 (cancerígeno) o 25 (no cancerígeno).

Valores utilizados:

EF	250
FI	1
ED (adulto)	25
IR	50
CF1	0,000001
BW	70
AT (cancerígeno)	70
CF2	365
AT (No cancerígeno)	25



Resultados ecuación:

C_{suelo} (Promedio ppm óxidos)		Dosis (Cancerígena)	Dosis (No Cancerígena)
As	458	0,000080	0,000224
Cu	12580	0,002198	0,006155
Ni	58	0,000010	0,000028
Pb	564	0,000099	0,000276
Zn	2220	0,000388	0,001086
Co	178	0,000031	0,000087
Cr	338	0,000059	0,000165

Contacto Dérmico

$$\text{Dosis} = \frac{C_{\text{suelo}} \times CF_4 \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{CF_2 \times BW \times AT}$$

- C_{suelo} es la concentración del elemento (mg/kg).
- CF_4 es el factor de conversión con unidad (kg x cm²)/(mg x m²).
- SA es la superficie expuesta de piel (m²/día).
- AF es el factor de adherencia de la tierra (suelo) a la piel (mg/cm²).
- ABS es el factor de absorción dérmica (adimensional).
- EF es la frecuencia de exposición (días/año).
- ED es la duración de la exposición (años).
- CF_2 es el factor de conversión para el tiempo de exposición (días/año).
- BW es el peso corporal de referencia de las personas (kg).
- AT es el tiempo de promediación (años), pudiendo ser 70 (cancerígeno) o 25 (no cancerígeno).

Valores utilizados:

CF4	0,01
SA	0,316
AF	1
ABS	0,001
EF	250
ED	25
CF2	365
BW	70
AT (cancerígeno)	70
AT (No cancerígeno)	25



Resultados ecuación:

	C_{suelo} (Promedio ppm óxidos)	Dosis (Cancerígena)	Dosis (No Cancerígena)
As	458	0,000005	0,000014
Cu	12580	0,000139	0,000389
Ni	58	0,000001	0,000002
Pb	564	0,000006	0,000017
Zn	2220	0,000025	0,000069
Co	178	0,000002	0,000006
Cr	338	0,000004	0,000010

Bibliografía complementaria para Evaluación del riesgo en la salud humana:

US EPA. (1989). Risk Assessment Guidance For Superfund Volume I. Human Health Evaluation (Part A). U.S. Environmental Protection Agency. Risk Assessment Forum. Washington, D.C. EPA/540/1-89/002. Obtenido de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags_a.pdf

U.S. EPA. (1995). Development of Risk-Based Concentrations. EPA Region III Risk-Based Concentration Table. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. Obtenido de: <https://hwbdocuments.env.nm.gov/Los%20Alamos%20National%20Labs/References/9642.PDF>

U.S. EPA. (2011). Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. EPA/600/R-09/052F. Obtenido de: https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=522996

