



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



PROPAGACIÓN DE MICROFRACTURAS EN LA CONMINUCIÓN Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN



Memoria para optar al Título de Geólogo

Cristian Daniel Benavente Padilla

Profesor Patrocinante : Dra. Ursula Elisabeth Dorothea Kelm
Profesores Comisión : Msc. Abraham Elías González Martínez
Dr. Oscar Alfonso Jerez Riveros

Concepción, 2019

RESUMEN

En un trabajo colaborativo entre la Universidad de Concepción y la *Technische Universität Bergakademie Freiberg*, Alemania, se desarrolla una variante del proyecto InnoCrush (Crushability Innovation) cuyo enfoque es la optimización del uso de energía en la conminución. En este caso el estudio se centra en los aspectos mineralógicos que puedan influir en la ruptura ocasionada por el mismo proceso, utilizando rocas afines a la geología y minería chilena como andesitas y basaltos, además de comparar distintas técnicas de observación de las microfracturas producidas.

Estas muestras de roca son descritas macroscópicamente y microscópicamente, junto con herramientas analíticas como QEMSCAN® (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*) y QMA (*Quantitative Microstructural Analysis*), además de algunas técnicas complementarias como difracción de rayos X (DRX) y espectrometría por fluorescencia de rayos X (FRX). El trabajo con el sistema QMA es desarrollado en Alemania como parte cooperativa entre ambas universidades.

Luego de las descripciones las muestras son pasadas por un chancador de mandíbula de laboratorio para generar pequeños fragmentos, éstos son dimensionados a briquetas, posteriormente se preparan cortes transparentes pulidos y, finalmente, se vuelven a describir bajo el microscopio óptico, QEMSCAN® y SEM.

Las observaciones indican que los aspectos cualitativos de los fenocristales antes de la ruptura como el estado estructural, la forma o la alteración, influyen en la propagación de la fractura a medida que ésta se encuentra con ellos. Aparentemente los fenocristales más intactos tienden a desviar las fracturas hacia sus bordes y a permanecer enteros hasta las fases finales del chancado. Aquellos que presentan un mayor deterioro suelen atraer las fracturas facilitando su camino a través de ellos.

Con respecto a los métodos de descripción y observación se recalca la eficiencia de la microscopía óptica para describir estructuras, salvo cuando la presencia de alteraciones es abundante. En este caso la técnica SEM adquiere cierta ventaja.

Para terminar se reconoce la utilidad del *software* QMA para describir matemáticamente los componentes de una roca, pero es necesario complementar con imágenes e interpretación.

ÍNDICE

Página

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Procedencia Muestras	3
1.2.1. Paso Los Libertadores	3
1.2.2. Complejo Volcánico Planchón-Peteroa	5
1.3. Metodología	5
1.3.1. Descripción Pre Ensayos	6
1.3.2. Ensayos	7
1.3.3. Descripción Post Ensayos	7
1.3.4. Análisis de Resultados	8
1.4. Trabajos Anteriores	8
1.5. Agradecimientos	10
2. ANTECEDENTES	11
2.1. Marco Geológico	11
2.1.1. Geología Paso Los Libertadores	11
2.1.2. Geología Complejo Volcánico Planchón-Peteroa	13
2.2. Proceso Minero	14
2.2.1. Tronadura	16
2.2.2. Conminución	17
2.2.2.1. Chancado	18
2.2.2.2. Molienda	21
2.2.3. Consumo de Energía	22

2.3. Técnicas Analíticas	23
2.3.1. Análisis Cuantitativo Microestructural (QMA)	23
2.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido	25
2.3.3. Mineralogía Automatizada QEMSCAN®	26
2.3.4. Difracción de Rayos X (DRX)	27
2.3.5. Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X (FRX)	28
3. CARACTERIZACIÓN INICIAL	30
3.1. Descripción Litológica	30
3.1.1. Descripción Macroscópica	30
3.1.2. Descripción Microscópica	32
3.1.3. Análisis por DRX y FRX	35
3.2. Análisis Cuantitativo Microestructural (QMA)	37
3.3. Descripción Estructural	43
3.3.1. Descripción Microscópica	43
3.3.2. Descripción Estadística	47
3.3.3. Descripción QEMSCAN® y SEM	52
4. CARACTERIZACIÓN FINAL	60
4.1. Ensayos	60
4.2. Descripción Estructural	62
4.2.1. Análisis del Contorno	63
4.2.2. Análisis Transicional	65
4.2.3. Análisis Central	68
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
5.1. Descripción Estructural	76
5.1.1. Andesita (A1)	76
5.1.2. Basalto (B2)	77

5.1.3. Basalto Vesicular	78
5.1.3. Resumen	79
5.2. Métodos de Caracterización	80
6. CONCLUSIONES	85
7. REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de Chile, Región de Valparaíso y Región del Maule	4
1. 2. Diagrama de flujo metodología de trabajo	6
2. 1. Mapa geológico Paso Los Libertadores	12
2. 2. Mapa geológico Complejo Volcánico Planchón-Peteroa	13
2. 3. Resumen esquemático del proceso minero	14
2. 4. Modelos de fracturamiento Inglis (1913) y Partridge (1978)	18
2. 5. Chancadores de mandíbula y giratorio. Wills y Napier (2006)	19
2. 6. Consumo energía operaciones mineras. COCHILCO	22
2. 7. Representación esquemática análisis puntual, lineal y areal. QMA	24
2. 8. Tipos de interacciones entre electrones y una muestra. Henry (2007)	26
2. 9. Esquema resumen del funcionamiento sistema QEMSCAN	27
3. 1. Difractograma muestra A1	35
3. 2. Difractograma muestra B2	36
3. 3. Difractograma muestra B3	36
3. 4. Disposición cortes ortogonales de andesita y plantilla datos QMA	38
3. 5. Ejemplo resultados obtenidos para un corte	40
3. 6. Histograma con la distribución de tamaños para los cortes	40

3.	7.	Estereogramas que muestran la orientación de las fases por cada corte	41
3.	8.	Estereograma de orientaciones y de forma promedio minerales	42
3.	9.	Tipos de interacción granos y cuadrícula secciones estudio estadístico	48
3.	10.	Cortes basalto vesicular escaneados	52
3.	11.	Imagen electrones retrodispersados en falso color	53
4.	1.	Esquema obtención cortes de briqueta	62
4.	2.	Solapamiento imágenes microscópicas briqueta	63

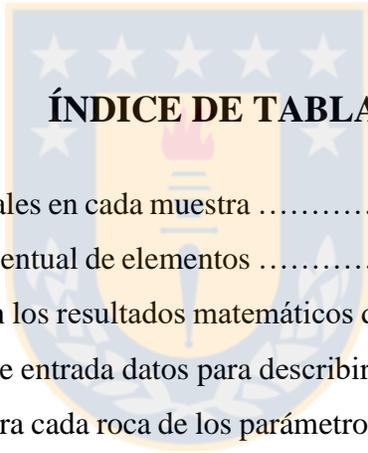
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
3. 1. Muestras macroscópicas A1, B2 y B3	31
4. 1. Chancadora mandíbula y fragmentos resultantes	60
4. 2. Fotografías briquetas obtenidas	61

ÍNDICE DE MICROFOTOGRAFÍAS

Microfotografía	Página
3. 1. Microfotografías muestras A1, B2 y B3	32
3. 2. Fractura mayor y microfracturas en plagioclasas	44
3. 3. Clasificación del microfracturamiento en fenocristales	45
3. 4. Plagioclasa y olivino basalto B2	46
3. 5. Fracturas y microfracturas en basalto vesicular B3	47
3. 6. Tipos de interacción en granos minerales	49
3. 7. Imágenes SE y BSE para cada roca	55
3. 8. Imágenes SE resaltando microfracturas	56
3. 9. Imágenes SEM y microscópicas andesita (A1)	57
3. 10. Imágenes SEM y microscópicas basalto (B2)	58

3.	11.	Imágenes SEM y microscópicas basalto vesicular (B3)	59
4.	1.	Interacciones entre fenocristales y bordes de fragmento	66
4.	2.	Imágenes fracturas B3G	68
4.	3.	Imágenes SEM para A1G, B2G y B3G	70
4.	4.	Imágenes SEM y microscópicas A1G y B3G	71
4.	5.	Imágenes microscópicas A1F, B2F y B3F	72
4.	6.	Imágenes SEM briquetas pulidas y no pulidas A1G, B2G y B3G	73
4.	7.	Imágenes SEM y microscópicas fenocristales microfracturados	74
5.	1.	Comparación distintos métodos de imágenes para B2G	83



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página	
3.	1.	Porcentajes minerales en cada muestra	34
3.	2.	Análisis FRX porcentual de elementos	37
3.	3.	Tabla resumen con los resultados matemáticos del QMA	43
3.	4.	Ejemplo planilla de entrada datos para describir los granos de un corte ...	50
3.	5.	Porcentaje total para cada roca de los parámetros descriptivos medidos ...	51
4.	1.	Resumen distribución componentes en bordes fragmentos gruesos	64
4.	2.	Resumen distribución componentes en bordes fragmentos finos	65
4.	3.	Resumen tipos de interacciones entre fenocristal y borde	67

1. INTRODUCCIÓN

El actual estudio se presenta como una variante de aspecto mineralógico del proyecto InnoCrush (Crushability Innovation o Innovación del chancado), desarrollado en la *Technische Universität Bergakademie Freiberg*, Alemania, donde el objetivo es mejorar la economía de la región de Sajonia por medio de la optimización del uso de la maquinaria, reduciendo costos energéticos y aumentando la selectividad en la extracción de materias primas.

La geología de esta parte central de Europa consiste en un orógeno de basamento metamórfico de medio a alto grado, constituido principalmente por esquistos micáceos y gneises con intercalaciones de eclogita. Los depósitos minerales son de origen hidrotermal ligados a un sistema de diques, donde se yacen en primer orden formaciones de Pb, Zn y Ag, y en segundo orden formaciones de S, Fe y Cu, entre otros.

Para el propósito de ese proyecto los factores considerados son: el incremento de la rentabilidad tecnológica en la excavación mecánica de roca dura; una mejor detección de los límites de estratos de roca; desarrollar tecnologías para una conminución selectiva *in situ*; aplicar métodos avanzados de caracterización mineral que faciliten una pre-evaluación del depósito respecto al proceso de excavación mecánica; impulsar el uso de modelamiento de procesos de excavación mecánica; evaluar la viabilidad y comercio de tecnología minera inteligente y menos invasiva.

La evaluación completa de estos puntos se resume en cinco aristas: mineralogía, excavación mecánica, conminución, modelamiento y automatización. Las primeras etapas de trabajo están guiadas por geólogos, mientras que las siguientes están en su mayoría dirigidas por ingenieros.

La parte geológica incluye la descripción litológica y mineralógica con microscopios y técnicas computacionales, además del estudio de los fragmentos resultantes en un test de corte. Este test de corte es llevado a cabo por una máquina que golpea la roca por medio de un cincel a velocidad y colocación definidas.

Una colaboración entre la Universidad de *Freiberg* y la Universidad de Concepción impulsó una pasantía por tres meses en 2017 y la oportunidad de formar parte del equipo de trabajo de geólogos. Durante ese tiempo y debido a las buenas relaciones establecidas, surgió la posibilidad de realizar un análisis similar acotado al área de caracterización mineralógica y estructural, utilizando en este

caso un chancador de laboratorio y enfocado en una de las petrologías dominantes de Chile, las lavas.

Para este efecto se utilizaron rocas de distinta procedencia como lo es una andesita del paso Los Libertadores y dos basaltos del complejo volcánico Planchón – Peteroa, uno vesicular y otro compacto. Todas las rocas fueron escogidas considerando el menor grado de alteración y fracturamiento posibles, para disminuir la incertidumbre sobre el origen de las fisuras una vez terminadas las pruebas de chancado.

Por consiguiente, la primera etapa de este estudio consiste en una caracterización de cada roca para determinar su composición y grado de fracturamiento antes de todo ensayo de laboratorio. Estas descripciones incluyen observaciones macroscópicas, microscópicas, QEMSCAN® (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*, o Evaluación Cuantitativa de Minerales por Microscopía Electrónica de Barrido) y SEM (*Scanning Electron Microscopy* o Microscopía Electrónica de Barrido), además de técnicas complementarias para mayor detalle como difracción de rayos X (DRX) y espectrometría por fluorescencia de rayos X (FRX).

Debido a la cooperación con la universidad de *Freiberg* se utiliza también un método desarrollado por el doctor Oleg Popov, denominado QMA (*Quantitative Microstructural Analysis* o Análisis Cuantitativo Microestructural), que utiliza la microscopía óptica como base y consiste en una caracterización cuantitativa de una roca para el procesamiento mineral, donde por medio de 3 cortes ortogonales entre sí, y su posterior análisis en *software* se establece un modelamiento tridimensional de parámetros microestructurales.

En una segunda etapa se efectúan pruebas de fracturamiento con un modelo de laboratorio de chancador de mandíbula para disminuir la roca y generar pequeños fragmentos de distinto tamaño. Estos son dispuestos en briquetas para estudiar las fracturas producidas, su propagación y posibles condicionantes, principalmente por medio de la comparación de microfotografías tomadas con microscopio óptico, SEM y el *software* QEMSCAN®. La eficacia de cada uno de estos métodos es también contrastada.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Determinar la existencia de parámetros mineralógicos o litológicos que condicionen la propagación de fracturas en la andesita y el basalto cuando son sometidos a procesos de chancado.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Hacer una descripción litológica y mineralógica acabada de las rocas, para estimar la influencia de estos parámetros en el grado y direccionalidad de la fracturación.
- Identificar estructuras previas a la fracturación, para comparar estados de propagación iniciales y finales.
- Comparar distintos métodos de preparación de cortes para estudiar las fracturas de la roca.
- Obtener imágenes de diferentes métodos de visualización para observar fracturas y comparar su eficiencia.
- Aplicar el método QMA y determinar su eficacia para estudiar el estado de fracturamiento de una roca.

1.2. Procedencia Muestras

Las tres muestras estudiadas provienen de dos lugares distintos, la andesita correspondiente al paso fronterizo entre Chile y Argentina “Los Libertadores”, cortesía del profesor Osvaldo Rabbia de la Universidad de Concepción, y los basaltos pertenecientes al complejo volcánico Planchón-Peteroa, facilitados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

1.2.1. Paso Los Libertadores

El Paso Los Libertadores o Paso Sistema Cristo Redentor, es la ruta que une las ciudades de Los Andes (Chile) y Mendoza (Argentina) a través de la Cordillera de los Andes. Ubicada en la Región de Valparaíso y a una altura aproximada de 3000 msnm.

Más específicamente se localiza 150 km al NE de Santiago y 65 km al E de la ciudad de Los Andes (Figura 1.1), dentro del valle del Aconcagua y junto al río Juncalillo. Sus coordenadas son 32°49' Latitud Sur, 70°05' Longitud W.

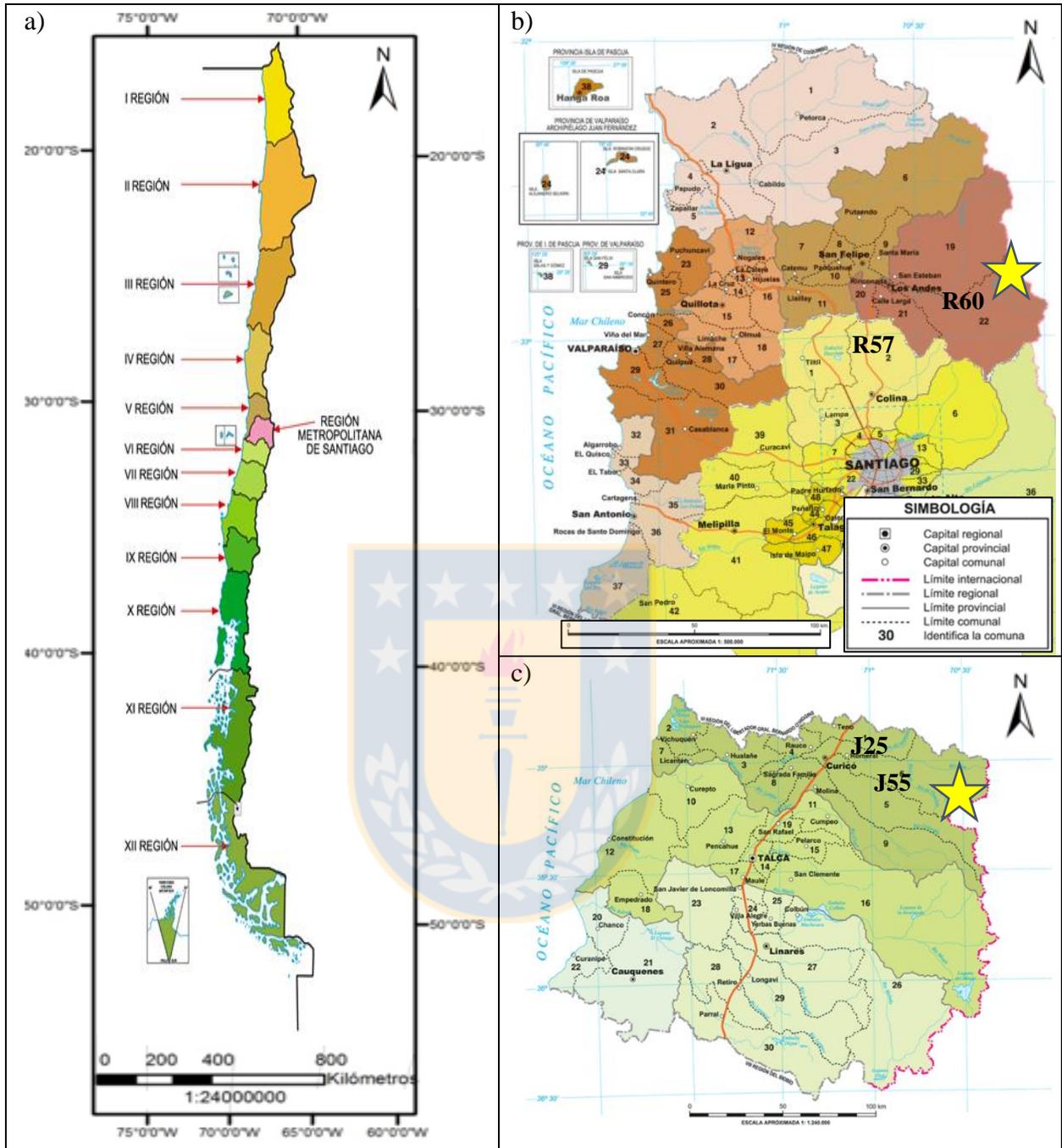


Figura 1.1: a) Mapa de Chile. b) Región de Valparaíso donde se ubica el Paso Los Libertadores (estrella amarilla). c) Región del Maule donde se ubica el volcán Peteroa (estrella amarilla). ww2.educarchile.cl.

El acceso se realiza desde Santiago por la autopista Los Libertadores o ruta 57 hacia el N, aproximadamente 90 km hasta San Miguel, y luego se continúa 60 km por el camino Internacional o ruta 60 hacia el E, pasando junto a los ríos Aconcagua, Juncal y Juncalillo.

1.2.2. Complejo Volcánico Planchón-Peteroa

Complejo macizo volcánico formado por tres estructuras volcánicas, que desde la más antigua hasta la más nueva, consisten en los volcanes Azufre, Planchón y Peteroa, siendo este último el origen de las muestras en estudio.

Se localiza en la frontera con Argentina a los 35°23' Latitud S y 70°57' Longitud W, en la comuna de Romeral, provincia de Curicó, Región del Maule, 70 km al E de la ciudad de Curicó y 270 km al SSE de Santiago.

El acceso se puede realizar tanto desde Santiago como de Curicó. Desde Santiago hay que tomar la carretera 5 Sur hasta la salida a la localidad de “La Monaña” en el km 170. Esta ruta se llama J 25 y se sigue aproximadamente 35 km hasta cruzar el puente del río Teno. A partir de aquí se continúa por la ruta J 55 hasta pasado el puente Río Malo y poco antes del control migratorio, donde se toma la bifurcación hacia las “Lagunas de Teno”. Este último tramo son casi 15 km en auto, y luego hay que terminar el trayecto a pie.

Desde Curicó se toma directamente la ruta J 55 hacia el E, aproximadamente 45 km pasando por “El Romeral” y “Los Queñes”, hasta llegar a la convergencia con la ruta J 25 que viene desde el norte.

1.3. Metodología

La metodología de este trabajo se compone de cuatro etapas, realizadas en el Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción y en la Universidad de *Freiberg*, Alemania, consistentes en: Descripción Pre-Ensayos, Ensayos, Descripción Post-Ensayos y Análisis de Resultados.

La primera consiste en describir el estado estructural de la roca previo al fracturamiento y determinar posibles zonas de ruptura o de debilidad; la segunda corresponde a la ejecución de ensayos de chancado y la generación de fragmentos pequeños para su análisis; la tercera consta de descripciones microestructurales de las fracciones disminuidas, y la última trata del análisis y comparación de los estados inicial y final para determinar posibles condicionantes de la difusión

de roturas, además de determinar diferencias en los métodos de observación de fracturas (Figura 1.2).

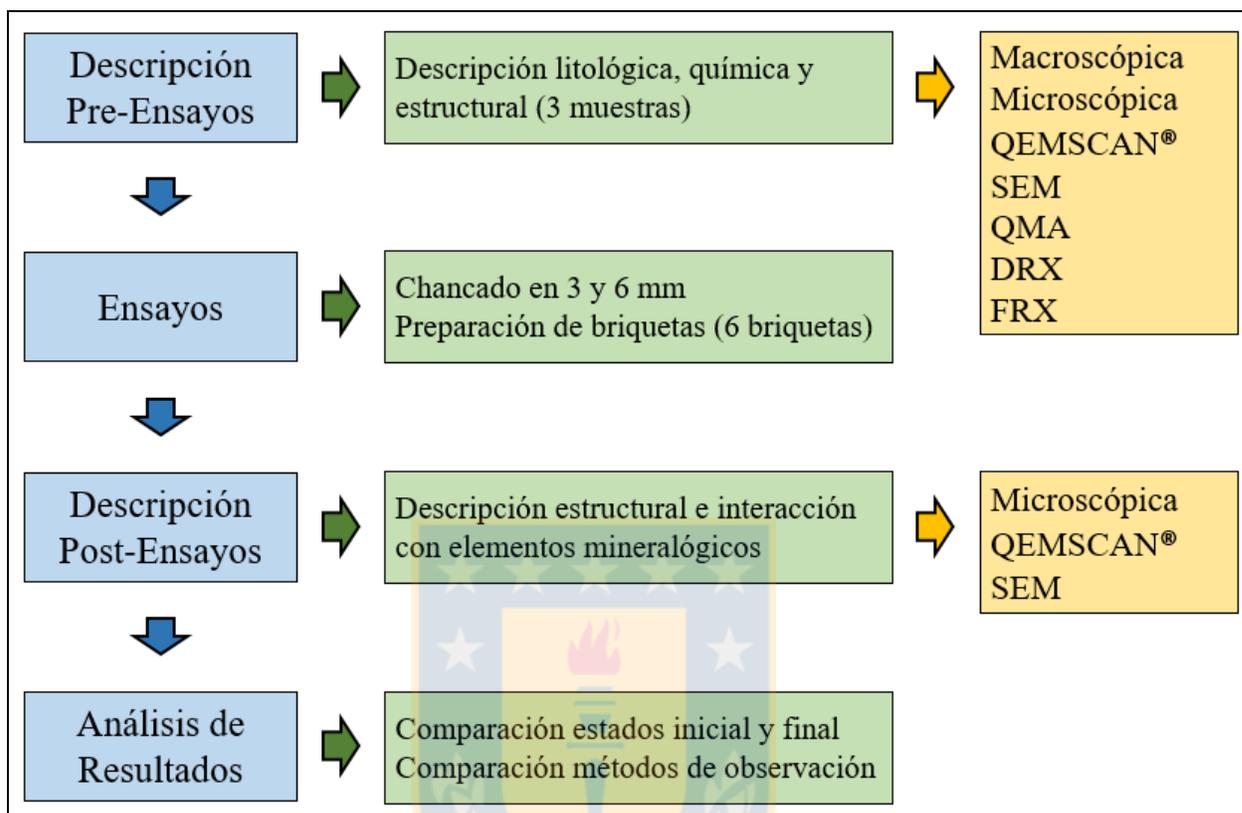


Figura 1.2: Diagrama de flujo metodología de trabajo.

1.3.1. Descripción Pre-Ensayos

Esta descripción se realiza en primera instancia de forma macroscópica, utilizando como herramientas la lupa y el rayador. Luego se elaboran tres cortes transparentes pulidos ortogonales para cada roca, preparados con resina petropoxy 154, y se observan con un microscopio NIKON modelo OPTIPHOT, diseñado para trabajar con luz polarizada plana transmitida y reflejada. Adicional a esto se utilizan los sistemas QEMSCAN®, de marca FEI, modelo Quanta, y SEM, que usa un microscopio electrónico de barrido Tescan Vega LSH y un detector de energía dispersiva (EDS) Bruker XFlash 4010.

Los tres cortes ortogonales de la muestra de andesita del paso Los Libertadores son analizados por el método QMA en Alemania y se adjunta la descripción e interpretación de sus resultados. Los

cortes de las otras dos rocas no fueron enviados por cuestiones de tiempo, pero sí son preparados bajo la misma metodología para una eventual continuación de los estudios.

Las descripciones mineralógicas son apoyadas por análisis de DRX para comprobar mediante otra vía el estado de alteración de las muestras, y por FRX para facilitar la clasificación y descripción litológica. La primera utiliza un difractómetro Bruker D4 Endeavor, y la segunda se ejecuta a través de un equipo Rigaku Primus II tipo dispersor de onda y operado con radiación de Rh (Rodio). La muestra que se utiliza en ambos métodos es un pulverizado de las rocas preparado en un molino planetario Pulverisette 6 Fritsch.

1.3.2. Ensayos

La fragmentación de la roca se hace en una pequeña chancadora de mandíbula Fritsch de modelo Pulverisette 1 (Fotografía 4.1, a), que tiene un rendimiento promedio de 140 kg/h, una separación de placas variable entre 1 y 15 mm, y ajustables de forma manual entre 10 medidas. Una placa quebrantadora es fija y ajustable, mientras que la otra es móvil y oscilante. El tamaño de salida determina sólo una dimensión del material tratado, por lo que una repetición del procedimiento homogenizará las dimensiones de la fracción resultante. Los anchos utilizados serán en promedio 3 y 6 mm, buscando determinar en cuál de ellos se observan de mejor forma las fracturas.

A partir de ambos tamaños (fracción gruesa y fina), se elaboran dos briquetas para cada roca (contabilizando 6 en total) con montaje aleatorio en resina epoxy. De estas briquetas se preparan cortes transparentes y cortes transparentes pulidos.

1.3.3. Descripción Post-Ensayos

En esta etapa se describe la superficie de los fragmentos resultantes y cómo su morfología pudo haber sido moldeada por los minerales constituyentes de la roca, además de buscar fracturas y posibles caminos de propagación. Estas observaciones se hacen a partir de los cortes de briqueta elaborados tanto en microscopio óptico como en los sistemas QEMSCAN® y SEM. Se comparan también las descripciones entre los cortes transparentes y los cortes transparentes pulidos, considerando que las fisuras superficiales son más o menos notorias según sea el grado de pulido del corte.

1.3.4. Análisis de Resultados

Finalmente se integra toda la información y se discuten los resultados obtenidos, comparando los estados previos y posteriores de la roca ante la inducción de la fractura, determinando formas óptimas de estudiar las fisuras en una roca, y concluyendo posibles características litológicas o mineralógicas que afecten la propagación de fracturas en ella.

1.4. Trabajos Anteriores

Los estudios anteriores abarcan trabajos sobre diferentes métodos para analizar los aspectos estructurales de las rocas y los minerales, y distintos mecanismos de fracturamiento para optimizar su funcionalidad.

Popov (2007), desarrolla el software QMA (*Quantitative Microstructural Analysis* o Análisis Cuantitativo Microestructural) que caracteriza matemáticamente el volumen porcentual de las fases minerales, el tamaño de grano, su forma, su rugosidad, su orientación y su distribución. Los resultados son proyectados en redes estereográficas.

Cabri y otros (2008), demuestran la eficacia de la disgregación por pulsos eléctricos (EPD), la hidroseparación (HS), y su uso combinado para liberar tipos específicos de especies minerales como las piedras preciosas u otras más blandas. Se basan en la ruptura por el borde mineral y la conservación de la forma original.

Tandon y Gupta (2013), estudian la influencia de la textura y la composición mineral en las propiedades petrofísicas y mecánicas de cinco litologías en el Himalaya a partir de análisis de regresiones: cuarcita, granito, gneis, metabasita y dolomita. Concluyen condiciones generalizadas como el inicio de la ruptura a partir de la orientación y cantidad de las micas, el control de ondas sísmicas por el parámetro textural del tamaño de grano y el aumento en la resistencia de la roca por la presencia de minerales como el cuarzo.

Pooler (2014), compara métodos de preparación de briquetas para analizar con QEMSCAN® y SEM-EDS, con el fin de optimizar la caracterización de materiales de lastre del yacimiento Río Blanco, división Andina. Determina que briquetas preparadas bajo un tamaño de grano inferior a

200 μm es favorable para un eventual efecto de segregación. Concluye además que una preparación de pulidos con etilenglicol reduce la disolución de minerales solubles en agua.

Popov y otros (2014^a), utilizan el *software* de análisis cuantitativo microestructural (QMA) para caracterizar un granito, un basalto y un gneis. Consideran la viabilidad de este método para estimar la forma y tamaño de los fragmentos de roca resultantes en un proceso de conminución.

Popov y otros (2014^b), detallan la influencia teórica de cada parámetro cuantificado con QMA en la formación de los productos de la conminución. Emplean correlaciones matemáticas directas e indirectas para expresar los resultados.

Shi y otros (2014), discuten los progresos de la conminución eléctrica usando pulsos de alto voltaje para mejorar la eficiencia energética de los procesos de molienda. Simulaciones matemáticas indican campos eléctricos de alta intensidad en los bordes minerales, especialmente cuando la conductividad eléctrica y la permitividad son muy diferentes.

Ündül y otros (2015), estudian la incidencia de las microtexturas de rocas volcánicas en el inicio del fracturamiento y su posterior propagación. Los estudios son a partir de ensayos uniaxiales en rocas de distintas localidades de Turquía. Determinan que a medida que aumenta el porcentaje de fenocristales se necesita más esfuerzo para la ruptura, y que ésta no inicia en las grietas preexistentes de los minerales, pero sí afecta la propagación.

Klichowicz y Lieberwirth (2016), programan un software automatizado que disminuye el tiempo de análisis del QMA, y permite un modelamiento más real de microestructuras sintéticas que aportan a la ciencia de la conminución.

Bravo y otros (2017), describen el gneis de *Freiberg*, Alemania, con el QMA para determinar sus propiedades mecánicas y se obtienen diagramas en dos dimensiones para proyectar una orientación espacial de sus componentes.

1.5.Agradecimientos

Este trabajo va dedicado principalmente para aquellas personas que han formado parte de manera continua y significativa en su elaboración, como lo son los profesores Ursula Kelm, Oscar Jerez, y todo el personal del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, Emiliano Navarrete, Miguel Jofré, Patricia Inostroza, Ximena Bruna, Nolvía Campos y Mónica Uribe, por su constante entusiasmo y orientación a lo largo de todo el proceso.

De igual forma agradecer a la Universidad de *Freiberg* en Alemania y a sus docentes Gerhard Heide, Oleg Popov y Arturo Bravo por el soporte durante y después de la estadía en dicho lugar, orientando y supervisando el plan del trabajo y los análisis siempre con buena disposición.

Finalmente reconocer el apoyo incondicional que brindan siempre los familiares y amigos en cada proceso de la vida, especialmente a mis padres.



2. ANTECEDENTES

2.1.Marco Geológico

Chile es un país localizado en la región andina de América del Sur, caracterizada por un ambiente tectónico de constante convergencia entre las placas Nazca y Antártica con la Sudamericana, situándose como una de las áreas de mayor actividad volcánica y sísmica de la tierra. Cuenta con más de 4000 centros volcánicos distribuidos en 6000 km de cadena volcánica (González-Ferrán, 1994). 2900 de estos se encuentran en el país y aproximadamente 90 en estado activo. 44 son monitoreados de forma continua por la Red Nacional de Vigilancia Volcánica del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Este contexto sitúa la petrología ígnea en la más abundante del territorio nacional, y cobra mayor relevancia al relacionarse de forma directa con los yacimientos minerales que son el sostén más importante de la economía del país, con exponentes mineros a nivel mundial como Chuquicamata, Pelambres o El Teniente, predominando litologías como granitoides, dacitas, andesitas, basaltos, entre otros.

2.1.1. Geología Paso Los Libertadores

La geología de esta zona se compone de secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias miocenas definidas por Klohn (1960) como Formación Coya-Machalí, y posteriormente como Formación Abanico por Aguirre (1960), al sur del valle del río Aconcagua (Figura 2.1).

Aflora de forma continua entre los 32° y 35°, y a partir de los 33° lo hace como dos franjas dispuestas de norte a sur separadas por una unidad más joven correspondiente a la Formación Farellones de edad Miocena (Klohn, 1960). La franja oeste es delimitada hacia el oeste por unidades mesozoicas y sedimentos cuaternarios discontinuos, mientras que la franja este es delimitada hacia el este sólo por unidades mesozoicas (Armijo y otros, 2010).

La Formación Abanico es descrita como 2500 m de depósitos volcanoclásticos y lavas ácidas a intermedias, con intercalaciones sedimentarias que alcanzan los 500 m de espesor y varían en origen, incluyendo aluvial, fluvial y lacustre. Corresponden principalmente a depósitos detríticos de grano grueso a fino, además de la presencia de algunas calizas. No presenta evidencia de sedimentación marina (Charrier y otros, 2002).

Se observan algunos minerales metamórficos de muy bajo grado, indicando el desarrollo de facies zeolíticas o de prehnita-pumpellita (Levi y otros, 1989; Vergara y otros, 1993).

Evidencia de terreno indica que se dispone de forma discordante sobre las unidades mesozoicas más antiguas, relación que se observa tanto de forma depositacional como tectónica. La primera es observada sobre todo en el flanco oeste, al norte de la depresión central, sobre las formaciones cretácicas Lo Valle (Gana y Wall, 1997) y Las Chilcas (Sellés, 2000). Los contactos tectónicos se presentan en distintos sectores del flanco este como fallas inversas; en el valle del río Maipo al sureste de Santiago, en la cuenca del río Cachapoal al sureste de Rancagua, en el valle del río Tinguiririca al este de Curicó (Charrier y otros, 2002).

Sobre esta unidad se encuentra la Formación Farellones (Klohn, 1960) de edad Miocena tardía (19 – 6 Ma), consistente en lavas andesíticas a riolíticas y sedimentos volcanoclásticos. Generalmente se dispone de forma discordante en los afloramientos, destacándose el mayor grado de plegamiento en la Formación Abanico (Charrier y otros, 2002).

La edad para Abanico es determinada entre 34 y 19 Ma según dataciones radiométricas de K/Ar en el trabajo de Gana y Wall (1997), es decir, Oligoceno – Mioceno Inferior.

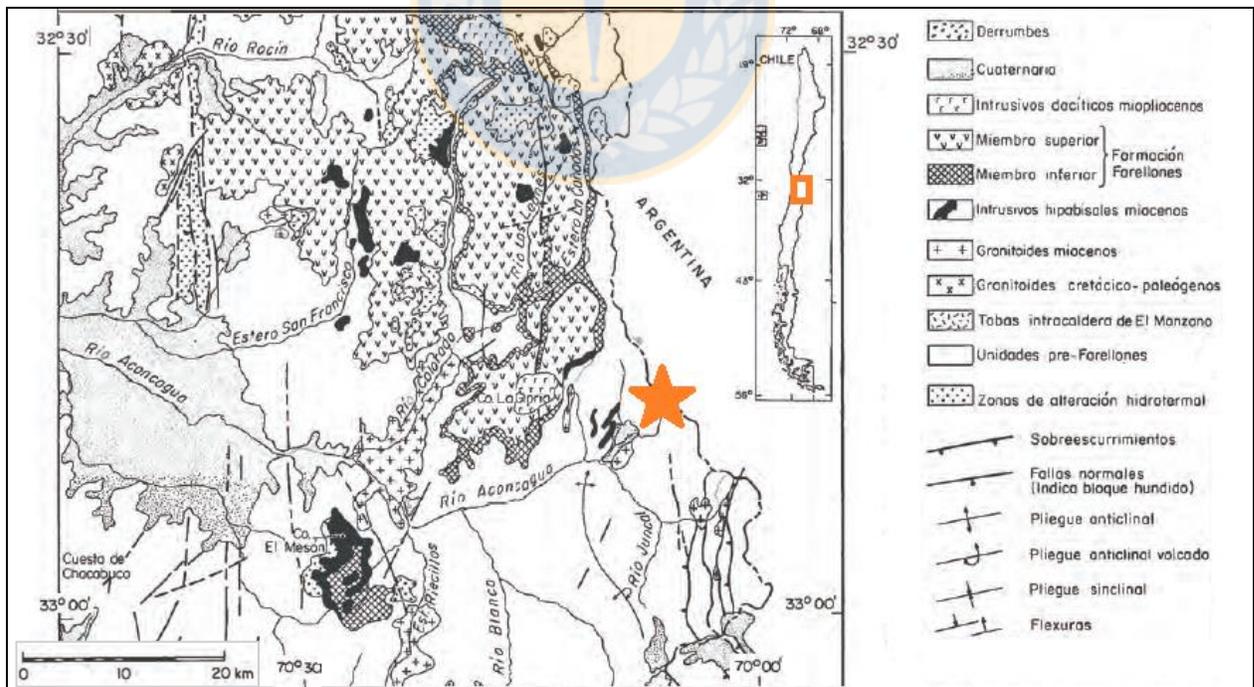


Figura 2.1: Mapa geológico modificado de Rivano y otros (1990). La estrella naranja indica el Paso Los Libertadores.

2.1.2. Geología Complejo Volcánico Planchón-Peteroa

El complejo volcánico se extiende por 6 km en la zona volcánica sur, a lo largo de una fractura de rumbo N 14° E, abarcando una superficie de 130 km² y alcanzando una altura de 4000 msnm (González-Ferrán, 1988) (Figura 2.2).

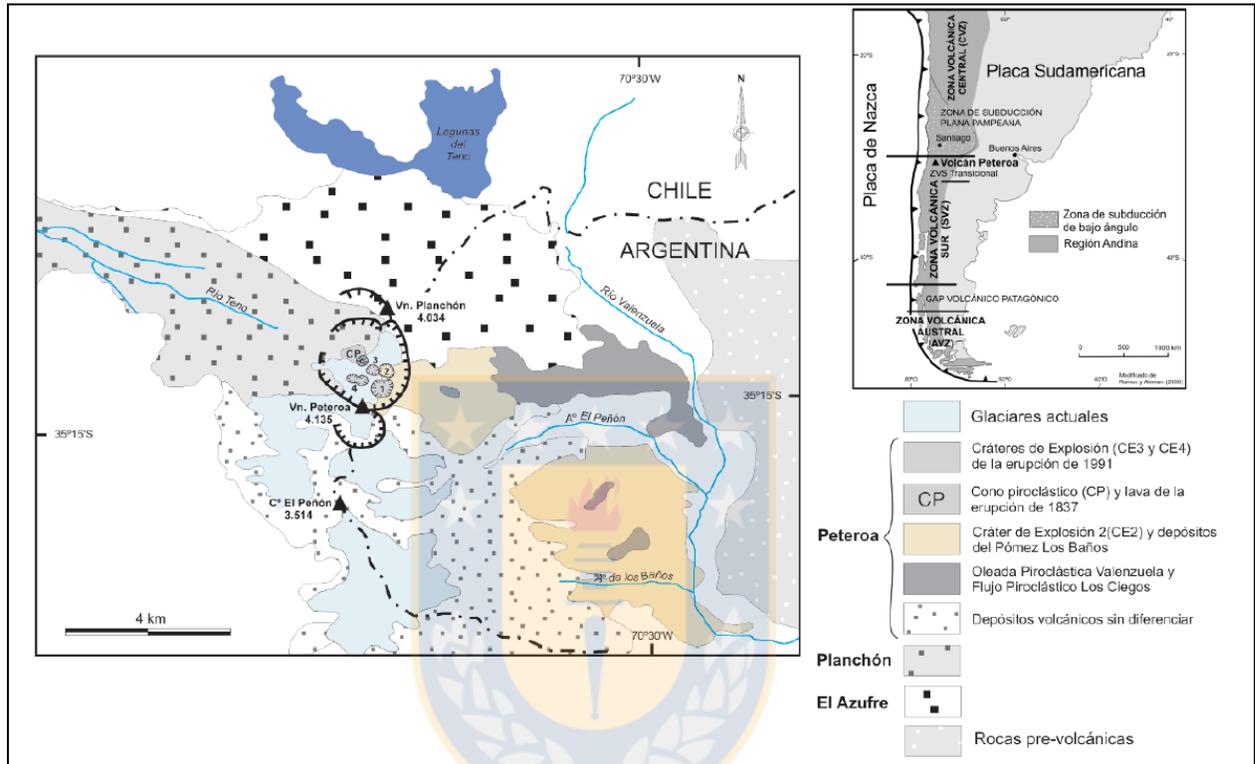


Figura 2.2: Mapa geológico modificado de Maffini y otros (2010) en M. J. Haller y C. Risso (2011).

Las unidades geológicas más antiguas expuestas en la zona corresponden a rocas sedimentarias que forman el basamento del volcanismo cuaternario. Pséfitas y psamitas de la Formación Puesto Araya se ubican en la base con una edad Hetangiana-Pliensbaquiana (Lanés, 2002), sobre éstas yacen la Formación Auquilco de yeso oxfordiano (Gulisano y Damborenea, 1993) y la Formación Tordillo de areniscas kimmeridgianas (Nullo y otros, 2005).

Cubriendo estas unidades sedimentarias se disponen volcanitas miocenas de la Formación Huincán (Linares y Gonzalez, 1990), y luego ignimbritas y tobas de la Formación Loma Seca, asociadas al centro volcánico del cerro Campanario al Sur del Peteroa (Nullo y otros, 2005).

A partir de aquí se presenta el Complejo Volcánico Planchón Peteroa, descrito como tres estructuras volcánicas sobrepuestas cronológicamente, que desde la más antigua corresponden a los volcanes Azufre, Planchón y Peteroa (Tormey, 1989).

Las lavas de la época eruptiva del primero incluyen andesitas basálticas y dacitas de edad pleistocena (Naranjo y otros, 1999), mientras que el segundo consiste en andesitas y andesitas basálticas del Pleistoceno Superior (Haller y otros, 1994). El último constituye el volcán actualmente activo, formado por basaltos y andesitas basálticas. Las emisiones más recientes consisten principalmente en pulsos discretos de gases y cenizas finas holocenas (Haller y Riso, 2011).

2.2. Proceso Minero

El proceso minero es un conjunto de etapas para el tratamiento mineral desde su hallazgo hasta su comercialización, incluyendo distintos tipos de extracción según sea la geología de la zona, y diferentes métodos de concentración dependiendo del mineral a tratar.

En líneas generales estas etapas son: Prospección, Exploración, Evaluación del proyecto, Construcción, Explotación, y Abandono (Figura 2.3).

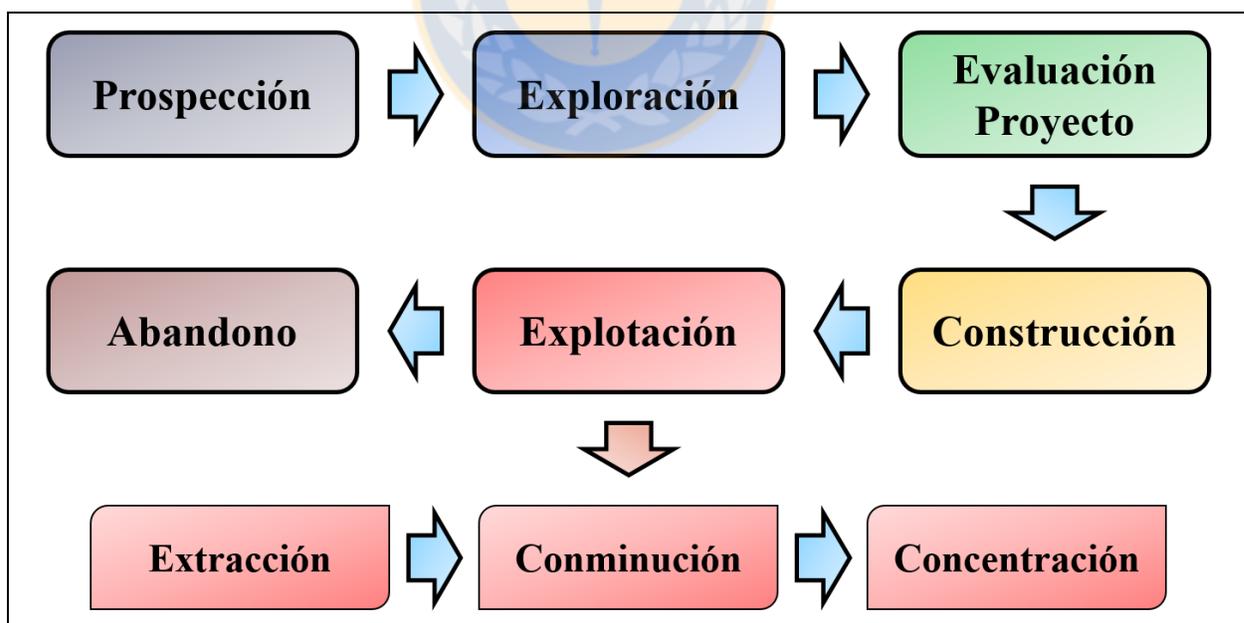


Figura 2.3: Resumen esquemático del proceso minero.

La primera consiste en la búsqueda de anomalías geológicas en la corteza terrestre, donde posiblemente exista algún depósito mineral que explotar. Para esto se utilizan herramientas como la geología regional, geofísica, geoquímica, imágenes aéreas o satelitales. Todo sirve y suma para encontrar un yacimiento, que posteriormente es estudiado en más detalle en la etapa de Exploración. En ésta se estudia la factibilidad económica del depósito, incluyendo la cantidad y calidad del mineral en cuestión, a partir de métodos como el muestreo de canales o la perforación de sondajes.

Una vez que el depósito es considerado rentable económicamente, se evalúa la preparación del proyecto para proceder a construir las instalaciones. Dentro de la evaluación se incluyen las decisiones para determinar el método de explotación y procesamiento, los montos a invertir, los costos de operación y comercialización, la empleabilidad, los aspectos legales y sociales, el tipo de equipamiento e infraestructura, y el estudio de impacto ambiental entre otros.

En la etapa de construcción se realizan todos los preparativos para poner en marcha la explotación del yacimiento. Se levanta el campamento y se procede a cimentar toda la infraestructura productiva.

Terminada la construcción se comienza con la explotación, que es el trato directo con la roca y el mineral. Puede ser superficial (cielo abierto) o subterránea dependiendo de la profundidad del yacimiento, pero en cualquiera de los dos casos, el primer paso es la extracción. Ésta comienza con la perforación de las zonas mineralizadas y la introducción de explosivos, que una vez tronados van a generar numerosos fragmentos de roca correspondientes a una mezcla de mena y ganga. Este material es transportado hacia la planta para comenzar con los procesos concentradores.

Antes que todo hay una reducción del tamaño controlada y progresiva denominada conminución, cuyo objetivo es la liberación de la superficie de contacto de la mena para tratarla con reactivos y facilitar su separación. Ésta puede ser principalmente de dos formas según sea el tipo de mineral en cuestión. Si se trata sulfuros, lo que se hace es una concentración por medio de flotación, donde el material molido se mezcla con agua y reactivos dentro de una celda, para luego introducir aire y formar burbujas que adsorben los sulfuros y ascienden. Esta suspensión resultante es filtrada y secada para luego llevarla a procesos de fundición y electro refinación.

Si la mena en el material reducido consiste en óxidos, lo que se hace es un apilado del material y su posterior rociado con agentes químicos que disolverán los minerales de mena (lixiviación). La solución resultante es puesta en contacto con reactivos químicos que extraen el metal, para luego ir a un proceso de electro obtención (Ballester y otros, 2000).

Finalizado el proceso de explotación de la mina, hay que llevar a cabo el cierre de la faena, desmantelando las instalaciones, compactando el terreno, en algunos casos reforestación, y si es posible recuperar la morfología de la zona.

2.2.1. Tronadura

La primera parte de la explotación es incidir sobre el fracturamiento de la roca es la tronadura, donde por medio de explosivos se transmite energía en forma de ondas sísmicas y gases al macizo rocoso para disminuirlo y desalojarlo de su posición. Esta fragmentación considera principalmente dos estados en el proceso, uno de choque producto del impacto por la detonación, y otro de explosión por la expansión de gases a alta presión y temperatura (Bernaola y otros, 2013).

La teoría más relevante al respecto es la de Onda de Choque por Hino en 1956, quien considera la detonación de una carga como una propagación de onda de compresión que tritura el material cercano a la carga, y que se refleja como una onda de tracción al alcanzar una superficie libre. Este mecanismo de fracturación por tracción es considerado como la base de la mayoría de los modelos de predicción de fracturamiento (Djordjevic, 1999).

El tipo de rotura que se produzca en la roca va depender de la respuesta ante el explosivo, y esta respuesta varía según dos factores: el tipo de roca y el tipo de explosivo. Por ejemplo una roca frágil siempre será más factible de fracturar que otra más elástica, ya que esta última absorbe en parte el impacto. El tipo de explosivo puede variar ampliamente en el compuesto, y siempre debe ser elegido en base al tipo de roca con la cual se tratará (Bernaola y otros, 2013).

En términos generales todo explosivo corresponde a una mezcla química que se inicia rápidamente por calor, choque, impacto o fricción. La detonación que se produce libera rápidamente calor y grandes cantidades de gases a alta presión, quienes se expanden con la potencia suficiente para vencer las fuerzas de confinamiento. Hoy los más utilizados están hechos a base de ANFO, que es una mezcla de nitrato de amonio y cantidades variables de aceite combustible. Éste posee un bajo costo comercial y es de fácil transporte (*International Society of Explosives Engineers, 2008*).

2.2.2. Conminución

La mayoría de los minerales son materiales cristalinos con átomos dispuestos de forma tridimensional, cuyo arreglo como estructura viene dado por su tamaño y tipo de enlace. Estos enlaces interatómicos son efectivos sólo a cortas distancias, y pueden ser rotos si el material es sometido a esfuerzos físicos como la compresión (Wills y Napier, 2006).

Incluso si la roca es cargada uniformemente, el esfuerzo interno que se genera no es repartido de forma equitativa, ya que la roca cuenta con distintos tipos de minerales, con diferente abundancia, características y tamaños. La distribución del esfuerzo depende de las propiedades mecánicas de cada mineral, pero más aún de la presencia de fracturas o zonas de debilidad preexistentes, que actúan como una zona de concentración de esfuerzos. Esto es estudiado por Inglis en 1913, quien determina que el incremento de stress en el punto final de una fractura, es proporcional a la raíz cuadrada del largo de la misma fractura perpendicular a la dirección de stress (Figura 2.4, a).

Griffith (1921) estudia que la ruptura se da principalmente a partir de la propagación de fracturas preexistentes, ya que toda la energía de la carga puede enfocarse en la grieta, en desmedro de zonas más sanas donde parte de la energía se consume en distorsionar la forma del material. También puede detenerse la propagación de fracturas en una dirección al encontrarse con otra fractura o borde mineral.

La inducción de fracturas se puede dar esencialmente por compresión, impacto o cizalle (Wills y Napier, 2006), según de cómo se aplique el esfuerzo sobre el material. El primer mecanismo es el más utilizado por la maquinaria en minería, y consiste en el aplastamiento por medio de dos superficies rígidas y formando dos tipos de tamaño, uno fino en la parte de la roca que se encuentra en contacto directo con la superficie chancadora, y uno más grueso correspondiente a la parte central de la roca (Partridge, 1978) (Figura 2.4, b). El mecanismo de impacto funciona aplicando un promedio de carga mucho mayor del necesario para generar una simple fractura, originando productos muy similares en forma y tamaño. El tercero trabaja desgastando la roca por medio de dos superficies que se mueven en sentido contrario, y produce material mucho más fino que normalmente en la industria intenta evitarse.

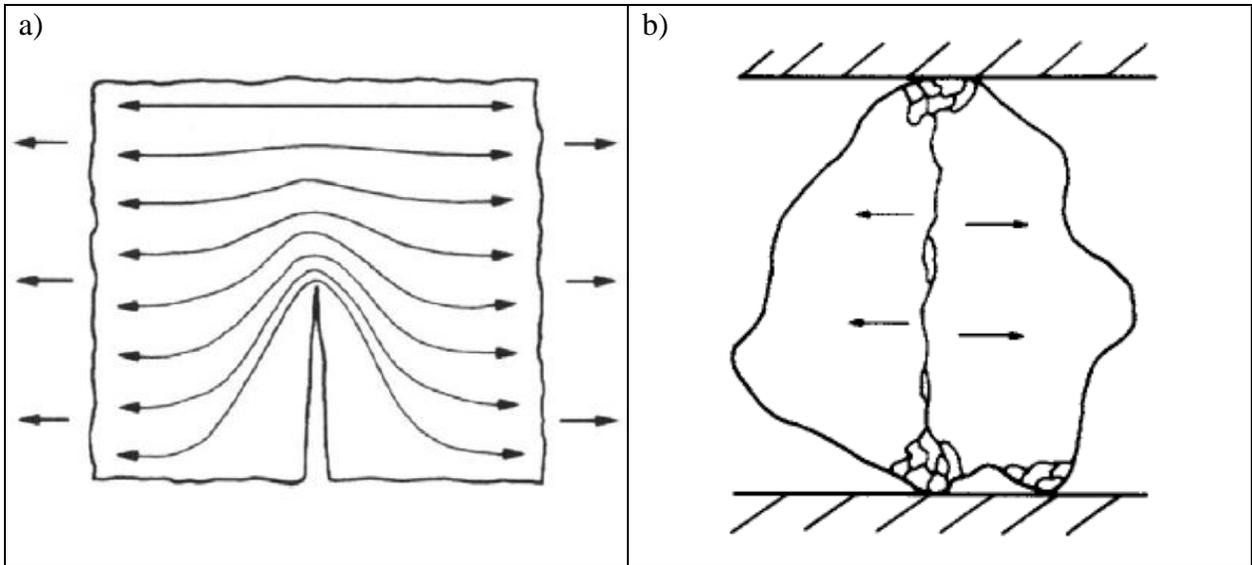


Figura 2.4: a) Concentración de esfuerzo en la punta de una fractura. Inglis 1913 en Wills y Napier, 2006. b) Modelo de fracturamiento por compresión. Partridge 1978 en Wills y Napier, 2006.

Existen tres teorías de distintos autores -Von Rittinger (1867), Kick (1885), Bond (1952)- que tratan la conminución, considerando la relación entre la energía que ingresa al sistema y el tamaño de las partículas resultantes, pero ninguna es del todo aceptable debido al gran porcentaje de energía que es absorbida por la misma máquina, dejando sólo una pequeña parte disponible para romper el material. Todas asumen que el material es frágil, y obvian el efecto elástico que puedan tener algunos componentes que les permita almacenar algo de energía (Wills y Napier, 2006).

La primera es de Von Rittinger (1867), y dice que la energía requerida para reducir el tamaño del material es calculada usando el promedio de los diámetros de las partículas antes y después del chancado. La segunda es de Kick en 1885, quien dice que el trabajo necesario es proporcional a la reducción de volumen de las partículas en cuestión. La última de Bond (1952), desarrolla una ecuación basada en la teoría de que el trabajo necesario es proporcional a la longitud de las nuevas grietas creadas. Hukki en 1975 sugiere que la relación entre energía y tamaño final de partícula es una forma compuesta entre las 3 leyes, ya que generalmente se han considerado como tres ecuaciones individuales.

2.2.2.1. Chancado

El chancado es el primer paso mecánico en el proceso de conminución. Generalmente es realizado en seco y en hasta tres etapas según sea necesario. Las rocas que entran pueden tener hasta 1,5 m

y se reducen en máquinas pesadas hasta 10 – 20 cm, luego pasan por un chancado secundario de maquinaria algo más liviana hasta obtener fragmentos entre 0,5 y 2 cm. Estas máquinas están diseñadas para trabajar el 75% del tiempo, considerando a veces la falta de material o mantenimiento. Dependiendo su aplicación, pueden consumir desde 180 kW hasta 1200 kW (Jeswiet y Szekeres, 2016).

Comúnmente se utilizan mallas metálicas para remover el material más fino que se va soltando, ya que éste puede causar problemas de funcionamiento tanto en la máquina por medio de obstrucciones, como en el fracturamiento cubriendo huecos entre las rocas más grandes. Para evitar el primer caso también es que se realiza a veces un lavado de los equipos.

La primera fase del chancado es la que recibe el material de mayor tamaño, por ende se utilizan chancadores de gran capacidad que normalmente corresponden al de mandíbula o al giratorio. Luego se va disminuyendo en envergadura de equipos para tratar el material cada vez más pequeño. Comúnmente los utilizados en estos estadios son el chancador de cono, de rodillo o de impacto, entre otros.

El chancador de mandíbula consiste en dos placas muy resistentes de hierro o acero, que se abren y cierran como una mandíbula animal. Están dispuestas en ángulo agudo, y una se encuentra fija con respecto a la otra. Según sea el punto de pivote de la palca oscilante existen 3 tipos de chancadores de mandíbula: *Blake*, *Dodge* y *Universal* (Figura 2.5, a).

El primero posee el punto de pivote en la entrada, lo que implica un tamaño de material entrante fijo, y un tamaño de salida variable. El segundo tiene el punto pivote en la salida, indicando una entrada variable y una salida fija. Este caso está restringido a uso en laboratorio y no industrial, debido a la facilidad con la que puede obstruirse el boquete de salida. El último mantiene el punto pivote al medio, dejando ambas aberturas con paso de tamaño variable.

Tienen un rango de apertura hasta 1680 mm y 2130 mm de ancho, pudiendo chancar material de 1,22 m a una velocidad promedio de 630 t/h. Sobre las 545 t/h el rendimiento económico comienza a disminuir, y a partir de las 725 t/h ya no pueden competir contra los chancadores giratorios (Lewis y otros, 1976).

El chancador giratorio consiste en un gran cono de acero atravesado a lo largo por un eje, y que rota dentro de una cámara también cónica, por donde pasan las rocas a fracturar. El cono va

aumentando de diámetro hacia la base, mientras la cámara lo hace de forma inversa, de forma que a partir de cualquier vista en corte, es posible identificar dos sistemas de chancado de mandíbula (Figura 2.5, b). Esto hace que tenga mayor capacidad, y por ende sea el más usado en la minería de superficie. En promedio tiene una abertura de 1830 mm y puede romper rocas de hasta 1370 mm, alcanzando una capacidad de 5000 t/h. Máquinas como estas consumen una energía de 750 kW (McQuiston y Shoemaker, 1978).

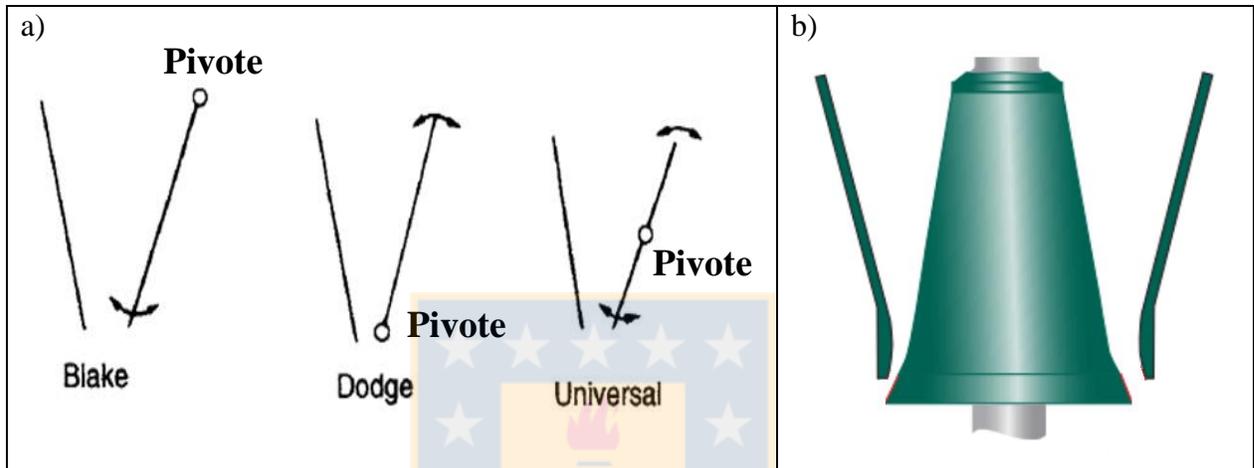


Figura 2.5: a) Tipos de chancadores de mandíbula. b) Vista perfil chancador giratorio. Wills y Napier, 2006.

El chancador de cono es un giratorio modificado y de menor envergadura, que funciona a una frecuencia más alta y permite mayor capacidad de retención del material antes de soltarlo, todo esto con el fin de facilitar la reducción del material. Las diferencias son la menor longitud del eje, su sujeción por la base en vez de por la parte superior, y la forma de la cámara que aumenta de diámetro hacia la salida. Tienen capacidades de hasta 1100 t/h y un tamaño de descarga de 19 mm (White, 1976).

El chancador de rodillo es básicamente un sistema de dos cilindros horizontales dispuestos uno frente a otro, que giran en sentidos opuestos y hacen pasar el material entre medio de ellos con una presión aproximada entre 10 y 30 MPa. Con el tiempo ha ido desapareciendo poco a poco en desmedro de aquel de cono, pero tiene su importancia en la facilidad con la que trabaja los materiales friables, pegajosos o húmedos, que en otros tipos de chancadores tienen tendencia a causar atascos en la salida de material.

Finalmente el chancador de impacto funciona como su nombre lo dice, bajo un mecanismo de impacto más que de compresión, esto quiere decir que en vez de aplicar un esfuerzo progresivo al material, se realiza uno de forma instantánea. Esto se traduce principalmente en una diferencia microestructural de los fragmentos obtenidos, ya que no da lugar al almacenamiento de energía en minerales más plásticos o la formación de zonas de debilidad que no alcanzaron a partirse, simplemente lo rompe todo a partir de un esfuerzo rápido y superior (Lewis y otros, 1976).

Consiste en una cámara donde se introduce material no mayor a 20 cm, y es golpeado repetitivamente por martillos de hasta 100 kg contra otra superficie fija a velocidades variables entre 500 y 3000 rev/min (Wills y Napier, 2006).

2.2.2.2. Molienda

Ésta es la segunda etapa dentro de la conminución y su objetivo es reducir aún más el material proveniente del chancado. Recibe partículas entre 5 y 250 mm de diámetro, para reducirlas a un rango de 40 a 300 μm , principalmente por una combinación de impacto y abrasión ya sea en seco o húmedo.

Existen numerosos tipos de molinos, pero generalmente son del tipo giratorio, que consisten en una cámara que gira sobre su propio eje, y contiene algún elemento de acero libre que va golpeando el material a moler. Uno de estos casos es el molino de barras, que puede alimentarse con material de hasta 50 mm y reducirlo a 300 μm , por medio del impacto repetitivo de barras que giran dentro de la cámara. Estas barras tienen una longitud sólo un poco menor a la longitud del contenedor, de forma que puedan girar libremente y alcanzar su mayor capacidad. En promedio poseen una potencia de 1640 kW (Lewis y otros, 1976).

Otro molino muy utilizado en minería es el molino de bolas, que a diferencia con el de barras, el elemento chancador son bolas de acero de hasta 3 pulgadas de diámetro y 3 kilos aproximadamente. Están diseñados para trabajar con más potencia que capacidad, y debido a su forma tiene mayor área de superficie por unidad de peso, siendo así más efectivo para materiales finos (Lewis y otros, 1976).

El molino SAG (*semi-autogenous grinding* o molino semi-autógeno) es similar al molino de bolas, pero la diferencia es que no sólo ocupa bolas para romper el material, sino que también ocupa trozos de la misma mena que está procesando. Para trabajar de esta manera se utiliza una cantidad

de bolas sólo correspondiente a un 4 – 15% del volumen total de la cámara, disminuyendo así el costo de capital y mejorando el consumo de energía (Powell y otros, 2001).

2.2.3. Consumo de Energía

La minería es una actividad que debido a la gran escala con la que se desempeña, se encuentra constantemente trabajando con elevados costos energéticos, y esto hace que la búsqueda de formas de optimización sea un desafío importante y permanente, apuntando a una reducción de tamaño y liberación mineral para mejores recuperaciones de la mena, bajo menores costos energéticos y menores emisiones (Shi y otros, 2014).

Una de las etapas que cobra bastante importancia en ese sentido es precisamente la conminución, que normalmente concentra más del 50% del consumo eléctrico de todo el proceso (Figura 2.6), alcanzando incluso el 70% en algunas mineras de cielo abierto. Por esto es que la ciencia tiende a apuntar a este proceso como uno de los puntos importantes a mejorar, abarcando tanto el uso de la maquinaria, como el provecho de las características mecánicas del material. En el primer caso, fuera de que normalmente se utilizan equipos de alto tonelaje y que de por sí ya contienen un gasto considerable, el hecho de tratar con rocas de distintos tamaños y propiedades mecánicas hace que se pierda mucha energía a la hora de la reducción, por ende un control más acabado del material alimentador resulta imprescindible (Awuah-Offei, 2018).

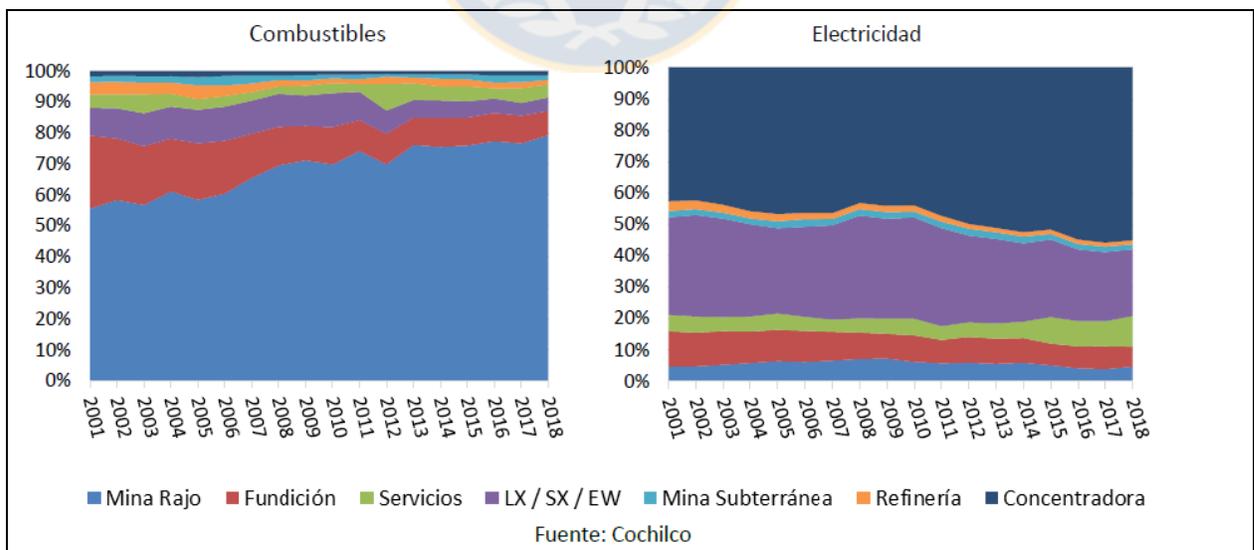


Figura 2.6: Consumo de energía en combustibles y electricidad para las operaciones mineras de cobre en Chile, 2001 – 2018. La etapa concentradora (conminución) posee el mayor consumo eléctrico. COCHILCO.

La conminución funciona aplicando cargas para romper la roca, sin considerar que hay zonas de ésta que sufrirían el mismo efecto bajo esfuerzos mucho más bajos, por lo que intentar homogeneizar los fragmentos que llegan a la planta de acuerdo a condiciones mecánicas o geológicas, sería una de las buenas opciones para reducir el excedente de energía desperdiciada (Gómez y Barahona, 2003).

Como se mencionó dentro de este mismo capítulo en el apartado 2.2.2, existen tipos de chancado y molienda con diferente funcionamiento y distinto consumo energético, de manera que un apoyo geológico de caracterización litológica y estructural previa a la conminución, para encontrar antecedentes de fragmentación en común dentro de un macizo rocoso, resulta necesario para elegir los equipos adecuados en cada caso.

Uno de los métodos que se ha investigado este último tiempo bajo el alero del Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) en colaboración con el SELFRAG AG, es la conminución eléctrica, que consiste en aplicar pulsos de alto voltaje a fragmentos de roca sumergidos en un medio acuoso, para liberar minerales específicos y más enteros, ésto debido a que los pulsos recorren zonas de debilidad como los límites de grano (Shi y otros, 2014). Estudios de Wang y otros (2012) indican que este mecanismo tiene el potencial para liberar el mismo grado de mineral que la conminución mecánica, pero utilizando menos energía.

2.3. Técnicas Analíticas

2.3.1. Análisis Cuantitativo Microestructural (QMA)

Este es un concepto colectivo para un gran número de métodos que analizan la geometría y propiedades mecánicas de los microconstituyentes de una roca. Normalmente la caracterización mineralógica y petrográfica se hace por medio de secciones delgadas o pulidas en un microscopio óptico, pero la realidad es que los constituyentes ocupan un volumen, poseen cierta geometría y tienen una orientación en el espacio, de manera que para realizar una descripción más completa de la roca es necesario hacer una reconstrucción tridimensional de los elementos (Popov y otros, 2014a).

En la mayoría de los casos la descripción de parámetros y propiedades de la roca se hace de forma visual, otorgando un carácter más cualitativo que cuantitativo. El QMA es un método estadístico matemático que busca darle una cuantificación a los componentes de la roca en tres dimensiones,

a partir de datos obtenidos en el estudio de tres cortes de una muestra ortogonales entre sí (Bravo y otros, 2017).

El análisis consiste en un conteo detallado de puntos en cada una de las secciones y su posterior procesamiento estereológico, cuya interpretación permite definir parámetros como la distribución de tamaño de grano, formas, orientación, rugosidad, superficie, distribución y relleno de espacios (Popov y otros, 2014b).

El trabajo de conteo en cada sección se hace por medio de tres métodos, un conteo puntual, otro de forma lineal, y el último areal (Figura 2.7). El primero consiste en evaluar una grilla de puntos y contar aquellos pertenecientes a distintos componentes, diferenciando fases minerales de poros o fracturas. Se determina así el volumen porcentual de cada uno. El segundo utiliza una grilla de líneas paralelas, donde en cada una se hace un conteo de los puntos de intersección entre distintas fases, midiendo así la longitud de cada grano mineral. Finalmente, el conteo areal se hace también a partir de una grilla de puntos, donde se consideran todas las secciones que abarcan una cara cortada de una fase mineral. Se determina de esta forma la distribución areal de los granos en un plano, que correlacionado a los resultados de las otras dos secciones ortogonales, permite calcular una distribución espacial (Klichowicz y Lieberwirth, 2016).

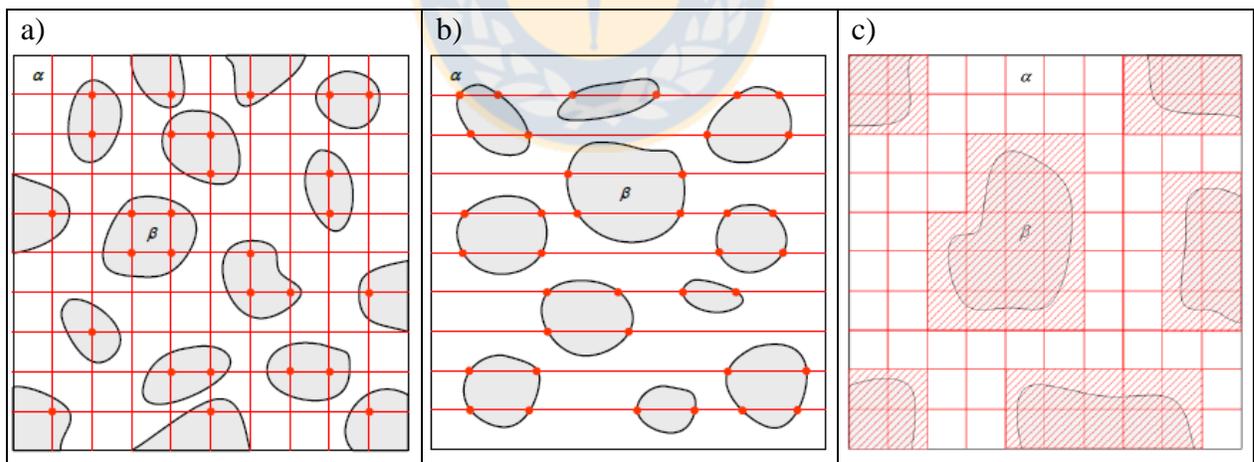


Figura 2.7: Representación esquemática del análisis puntual (a), lineal (b) y areal (c), Popov 2007 en Klichowicz y Lieberwirth 2016. Se observan dos fases, no diferenciada (α) y cristalina (β).

Es importante tener claras las orientaciones de las secciones y realizar una descripción detallada de la masa fundamental, ya que el análisis considera solamente los fenocristales y en cantidades mayores al 15%.

2.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido

Normalmente denominada por su sigla en inglés SEM (*Scanning Electron Microscope*), es una técnica microscópica de alta resolución que reproduce en imágenes la morfología y superficie de las partículas a partir de la interacción electrón-materia.

Consta principalmente de dos partes, una columna donde se genera un fino haz de electrones que barre la superficie de la muestra, y un conjunto de detectores que miden y registran las señales emitidas por el contacto entre el haz y el material (Figura 2.8, a). Todo funcionando al vacío (Ballester y otros, 2000).

Los electrones son originados en la columna por el calentamiento de un filamento de tungsteno o hexaboruro de lantano, y posteriormente acelerados hasta un potencial de 30 kV para incidir en la muestra con fuerza. Son además enfocados en el trayecto por medio de lentes condensadores y objetivos, con el propósito de adelgazar el haz lo más posible. Hacia el final de la columna se ubican unas bobinas deflectoras que provocan el movimiento del haz en forma de barrido para completar un escaneo punto a punto (Ballester y otros, 2000).

En la incidencia de los electrones con el material se producen numerosas interacciones y señales que son captadas por distintos tipos de detectores, otorgando diferentes tipos de información (Figura 2.8, b). Las más comunes captadas por el SEM son los electrones retrodispersados (*backscattered electrons* o BSE) y los electrones secundarios (SE). Los BSE son electrones primarios que cuando inciden sobre la muestra no penetran en ella, sino que sufren una especie de reflexión cuya energía es directamente proporcional al número atómico (Z) promedio de la muestra. La imagen obtenida se presenta en una escala de grises, donde las zonas brillantes corresponden a un Z alto, y las oscuras a un Z bajo. Los SE son electrones externos de los átomos de la muestra, arrancados durante la incidencia de los electrones primarios. Son poco energéticos y muy sensibles al ángulo de incidencia, por lo que dependen de la rugosidad que presente la superficie de la muestra (Vaughan y Wogelius, 2013).

Mientras los BSE dan una imagen donde los cambios de contraste se deben a cambios en la composición química, los SE otorgan imágenes electrónicas con un contraste topográfico (Vaughan y Wogelius, 2013).

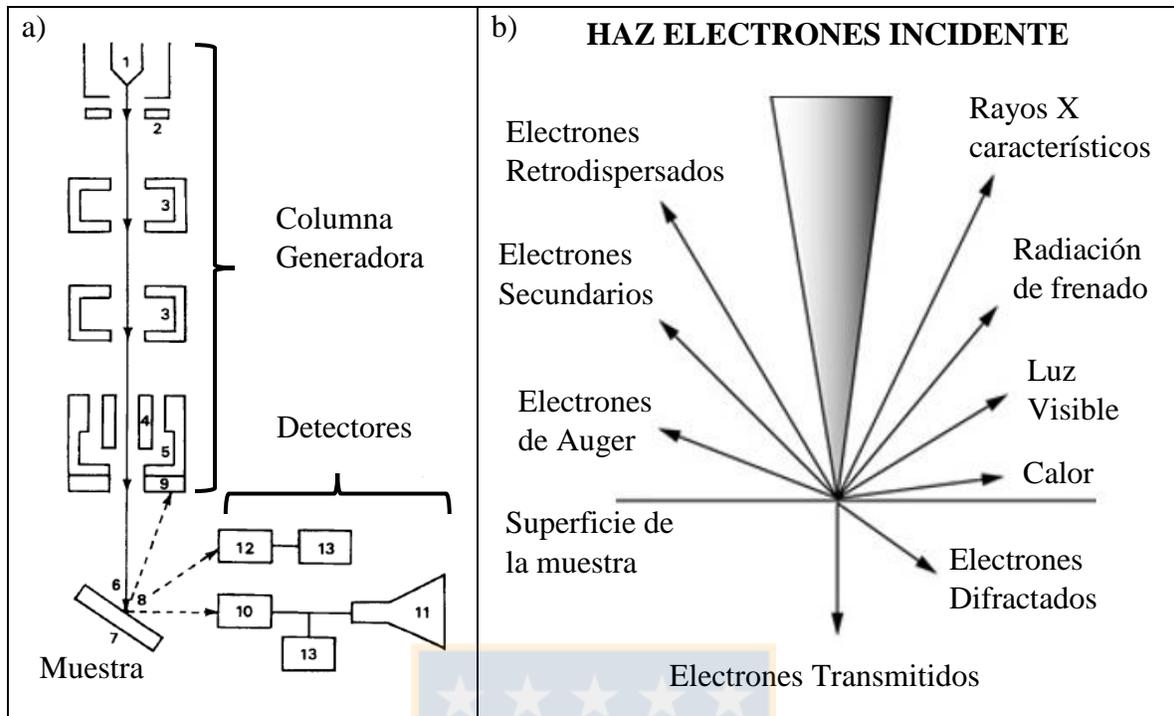


Figura 2.8: a) Esquema partes microscopio electrónico de barrido. Ballester y otros, 2000. b) Tipos de interacciones entre electrones y una muestra. Henry 2007.

2.3.3. Mineralogía Automatizada QEMSCAN®

El QEMSCAN® (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) es un sistema de mineralogía automatizada que identifica fases minerales a través de la combinación de imágenes de BSE y espectros de energía dispersiva de rayos X (EDS).

Este sistema está integrado por un SEM y en el trabajo actual por dos detectores EDS, además de un *software* controlador que almacena la información de los minerales en un SIP (Species Identification Protocol) para comparar las señales con datos existentes. Este SIP puede ser modificado según sean los intereses de la investigación (Ayling y otros, 2012).

El funcionamiento se basa en el escaneo punto a punto, generalmente a 100 cps (cuentas por pixel), de una muestra pulida y preparada con resina siguiendo una malla regular (Figura 2.9). Por medio de BSE se diferencian las partículas minerales y con los detectores EDS se adquieren espectros de rayos X para identificar los elementos químicos. A través del procesamiento con el *software* se realiza una semi-cuantificación de los elementos, y una identificación de fases minerales a partir de sectores con similar composición química. Luego se le asigna un color a cada composición o

fase mineral, y se va completando de forma progresiva la malla regular con un color por pixel. Se genera de esta forma una imagen en falso color de la muestra indicando las fases minerales y su distribución (Gottlieb y otros, 2000).

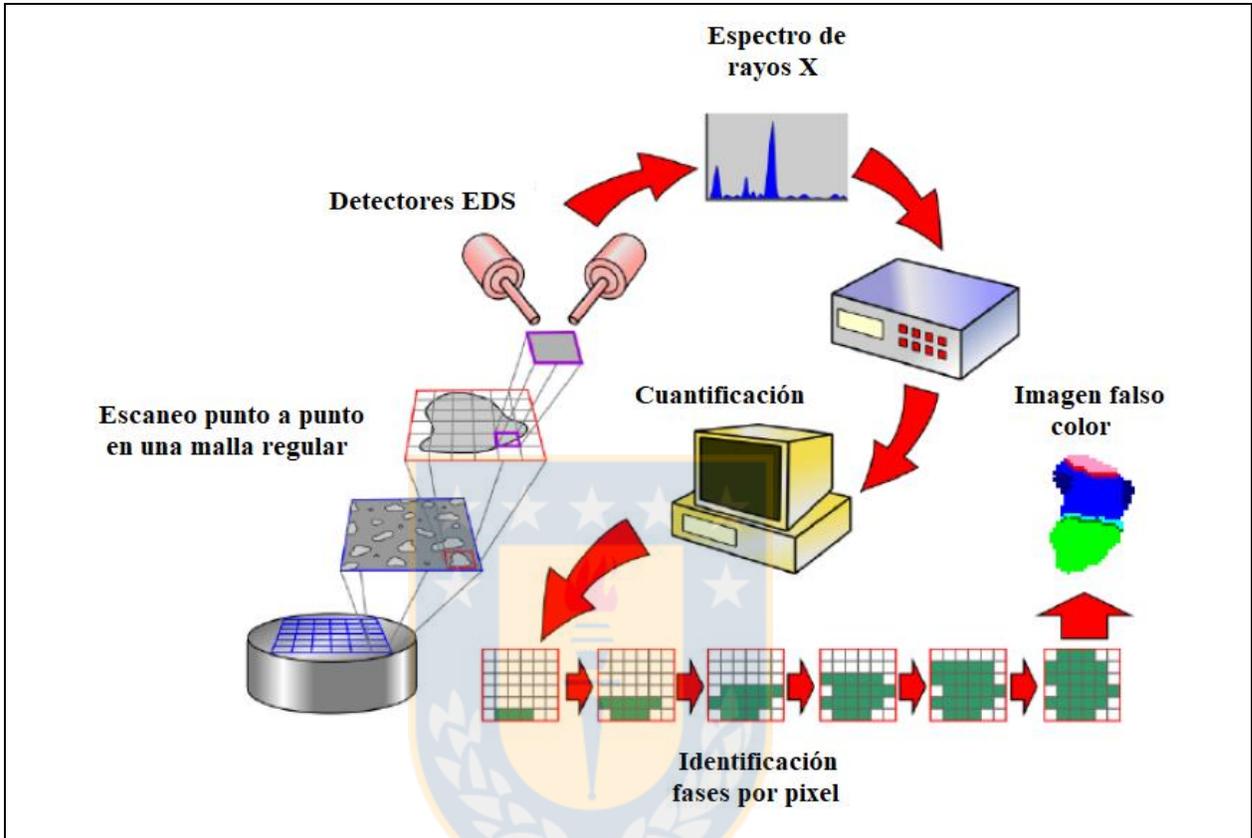


Figura 2.9: Esquema resumen del funcionamiento sistema QEMSCAN®. Modificado de Minsoc 2007.

2.3.4. Difracción de Rayos X (DRX)

Es una técnica de caracterización para sustancias cristalinas, que a partir de la incidencia de rayos X y su difracción a través del material, permite dilucidar su estructura interna, considerando que ésta es única para cada especie (Ballester y otros, 2000).

Su origen se remonta a 1895 cuando Wilhelm Conrad Roentgen descubrió por casualidad los rayos X, que son radiaciones electromagnéticas de alta energía y longitud de onda entre 10 y 0,001 nm, capaces de atravesar cuerpos opacos e imprimir películas fotográficas. En 1912 Max von Laue comenzó a utilizarlos en el estudio de la cristalografía, y en los años siguientes William Henry

Bragg y su hijo William Lawrence Bragg simplificaron sus métodos y crearon la ecuación de Bragg (Dana en Klein y Hurlbut, 1996).

Esta ecuación (1) guía el funcionamiento de la difracción de rayos X relacionando matemáticamente la longitud de onda incidente (λ) y el espaciamiento entre átomos de un material (d). θ corresponde al ángulo de incidencia del haz.

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

Cuando el haz de rayos X incide sobre la muestra y alcanza los átomos de la estructura interna, sufre el fenómeno de difracción desviándose en distintas direcciones. Lo mismo ocurre en cada una de las capas paralelas de átomos que forman una cara del cristal. Si estas ondas difractadas de dos capas adyacentes coinciden en ángulo y un retardo de distancia correspondiente a un número entero de longitud de onda, se van a encontrar en fase y por lo tanto se forma una interferencia constructiva. Este haz difractado es el que cumple con la ecuación de Bragg y por ende el que indica el espaciamiento del material (Vaughan y Wogelius, 2013).

Debido a que una muestra común de roca posee numerosas especies minerales, lo que se hace primero es pulverizarla para disponer de partículas cristalinas en cualquier orientación, y luego exponerla al haz en variados ángulos, así se abarcan todas las difracciones posibles y se registran todos los espaciamientos presentes. Estos corresponden a la mineralogía total de la muestra (Dana en Klein y Hurlbut, 1996).

2.3.5. Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X (tipo dispersor de onda)

Este método se fundamenta en la exposición temporal de una muestra a radiación X, para luego captar las emisiones secundarias o fluorescentes que se producen, y que son características de cada elemento químico presente (Ballester y otros, 2000).

Al igual que la difracción antes mencionada, esta técnica fluorescente se basa en la incidencia de un haz de electrones y el cumplimiento de la ecuación de Bragg, pero en este caso el espaciamiento entre los planos atómicos adyacentes es conocido. Lo que se necesita determinar son los distintos valores de longitud de onda de los rayos X difractados.

El mecanismo consiste en irradiar temporalmente con rayos X una muestra pulverizada y compactada. Estos rayos son absorbidos por los elementos siguiendo la ley de Beer (2), donde I_0 es la intensidad de los rayos incidentes, I la intensidad del haz que no fue absorbida, K_d una constante de proporcionalidad y Δd el espesor de la muestra.

$$\log (I_0 / I) = K_d \Delta d \quad (2)$$

Esta absorción se da expulsando los electrones de las capas más internas del átomo, para que aquellos que se encuentran en niveles más externos se desplacen para ocupar el lugar desalojado. Este desplazamiento de electrones desde capas externas a internas para ir ocupando los espacios vacantes se da sucesivamente, y estos son los movimientos que generan la emisión de energía en forma de radiación X secundaria característica (Dana en Klein y Hurlbut, 1996).



3. CARACTERIZACIÓN INICIAL

3.1.Descripción Litológica

3.1.1. Descripción Macroscópica

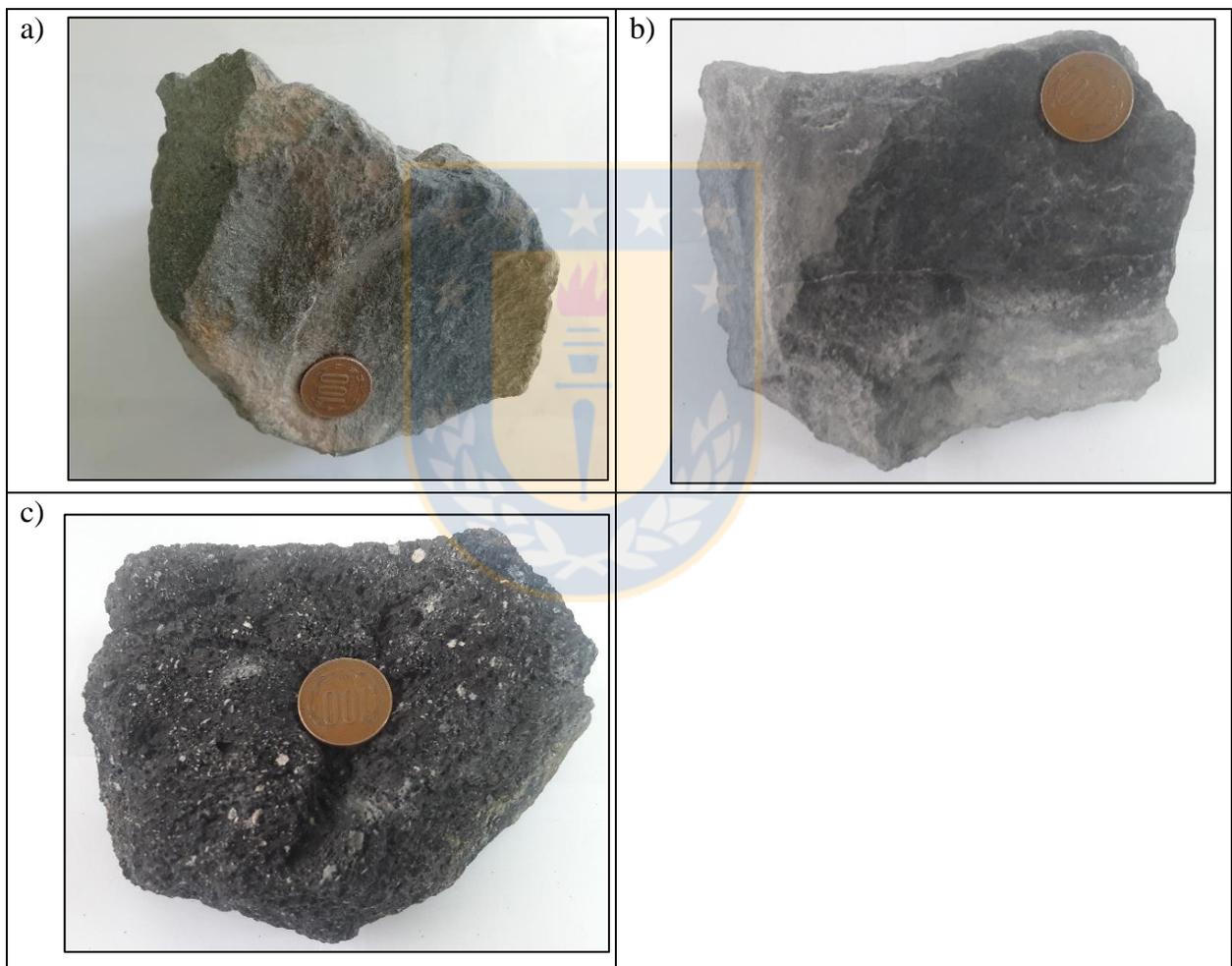
La primera descripción de las rocas fue de forma macroscópica, considerando litología, mineralogía y estructuras. Las muestras fueron extraídas de zona fresca con la intención de que presentaran el menor desgaste posible, principalmente en cuanto a estructuras y alteración. El objeto de esto era que la roca no tuviese microfisuras, y si es que las tenía, pudiesen ser vistas y descritas en detalle. De este modo una vez terminados los ensayos de chancado, se podrían definir todas las nuevas estructuras como productos de este proceso.

Las tres muestras son rotuladas enumerándolas del 1 al 3, y anteponiendo la inicial de la litología correspondiente para cada caso. Así la muestra proveniente del paso Los Libertadores queda como A1 (andesita), y las muestras del volcán Peteroa como B2 (basalto) y B3 (basalto vesicular).

La muestra A1 es una roca volcánica con superficie mayoritariamente fresca y de color gris verdoso (Fotografía 3.1, a). La superficie alterada posee leves tonalidades entre amarillo y café. Presenta textura porfídica con masa fundamental afanítica, donde los fenocristales alcanzan el 45% entre plagioclasas (38%) y máficos (7%). Estos últimos se distribuyen de forma equitativa entre anfíboles y piroxenos. El restante 55% perteneciente a la masa fundamental sólo presenta algunas plagioclasas visibles con lupa. Posee una leve alteración de tipo argílica por la presencia de arcilla en las plagioclasas, y una aún más leve alteración clorítica o propilítica en las zonas de máficos. No se observan estructuras ni mineralización, pero presenta un magnetismo de medio a leve. El peso de la muestra disponible para el estudio es de 2 kg.

Las dos muestras del volcán Peteroa son muy distinguibles entre ellas, siendo una totalmente compacta (B2) y otra notoriamente vesicular (B3). La primera es una roca volcánica con extendida superficie de alteración argílica pero de expresión leve. La parte fresca tiene un color entre gris y negro con tonalidades verdosas, y la parte alterada un tono más blanquecino y zonas café amarillentas. Muestra una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas que no alcanzan el 5%, y una masa fundamental afanítica donde no se distingue mineralización ni estructuras. La muestra es densa, pesa 2,5 kg y presenta un magnetismo entre medio y leve (Fotografía 3.1, b).

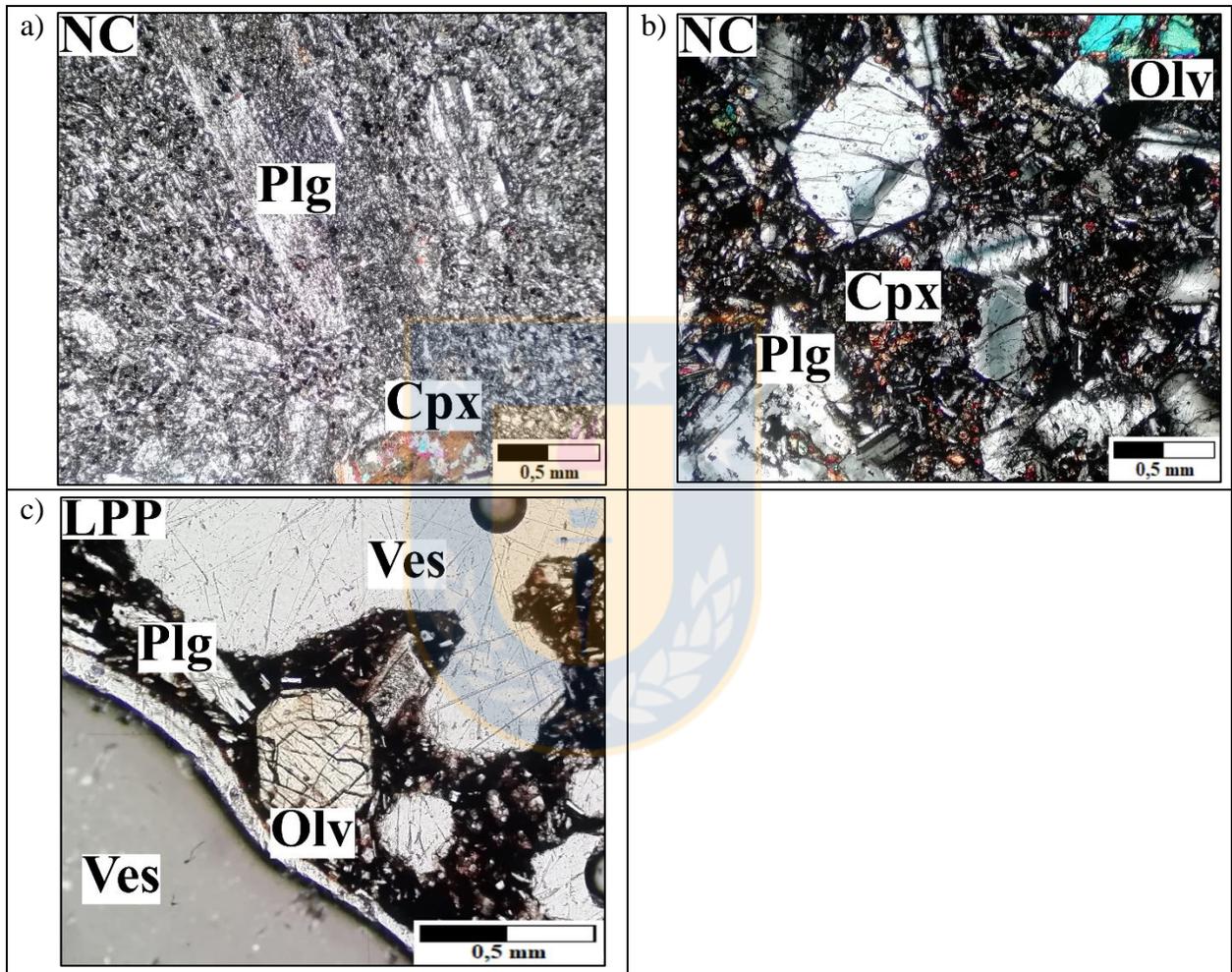
La segunda muestra del volcán Peteroa (B3) también es de carácter volcánico, pero esta vez casi sin alteración, de color negro con algunas tonalidades entre gris y verde; las pequeñas porciones alteradas son de color café amarillento por oxidación. Su textura es porfídica y de masa fundamental afanítica, con 11% de fenocristales entre plagioclasas (10%) y olivino (1%), y el resto de carácter vítreo con gran cantidad de vesículas. Tampoco se observan estructuras ni mineralización, pero evidencia un leve magnetismo. La muestra es poco densa y pesa 1,5 kg (Fotografía 3.1, c).



Fotografía 3.1: Muestras macroscópicas. a) Andesita Paso Los Libertadores (A1). b) Basalto volcán Peteroa (B2). c) Basalto vesicular volcán Peteroa (B3).

3.1.2. Descripción Microscópica

Si bien se tenía una idea bastante clara de la petrografía a partir de las descripciones macroscópicas, la observación en cortes transparentes pulidos, cuyo principal objetivo era determinar el estado microestructural de las rocas, fue de ayuda para clasificar definitivamente las muestras como Andesita (A1), Basalto (B2) y Basalto vesicular (B3) (Microfotografía 3.1).



Microfotografía 3.1: Microfotografías. a) Andesita de clinopiroxeno (A1), 50x. b) Basalto de olivino y clinopiroxeno (B2), 50x. c) Basalto vesicular de olivino (B3), 100x. NC: Nícoles cruzados, LPP: Luz polarizada plana, Plg: Plagioclasa, Cpx: Clinopiroxeno, Olv: Olivino, Ves: Vesícula.

Nueve cortes transparentes pulidos fueron preparados y descritos en detalle. Para cada roca corresponden tres secciones ortogonales entre sí denominadas Zy, Zx e Yx (considerando los ejes de un sistema de coordenadas), las cuales considerando en primera instancia sólo la litología, son

muy similares entre ellas refiriéndose a minerales y alteraciones. Por esta razón las descripciones de los tres cortes de cada roca son agrupadas en un mismo cuerpo, y resumidas en la Tabla 3.1.

La andesita (A1) presenta una textura porfídica seriada con masa fundamental hipidiomórfica granular de grano fino y microlitos de plagioclasa y piroxeno. Los fenocristales constituyen el 42% y en su gran mayoría son plagioclasas (20%) con reemplazo zonal de sericita (10%), además de algunas cantidades de piroxenos (5%), anfíboles (2%), calcita (2%), epidota (2%), clorita (1%), esfalerita (<1%) y calcopirita (<1%). El tamaño de las plagioclasas es en promedio mayor a 1 mm alcanzando incluso los 4 mm, mientras que el resto de los minerales ronda los 0,1 mm salvo por los piroxenos, que bordean los 0,3 mm. La masa fundamental se considera fina por poseer un tamaño de grano inferior a los 0,0625 mm, y corresponde a una dispereja distribución entre plagioclasas (36%), piroxenos (10%) y anfíboles (3%). Presenta también una escasa mineralización compuesta por magnetita (7%) y hematita (2%), éstos se localizan preferentemente en los clinopiroxenos y algunos pocos dispersos. Por último se distinguen dos tipos de alteración, una sericítica y otra propilítica, la primera de grado medio y la segunda de grado bajo.

El basalto (B2) muestra una textura porfídica seriada con masa fundamental intersertal e intergranular. Localmente presenta textura *sieve*, y en dos de los tres cortes (Yx y Zx) la masa fundamental se ve levemente hialopilitica. Los fenocristales se constituyen por plagioclasas (33%), olivinos (7%) y piroxenos (4%), los primeros con un tamaño promedio de 1x1 mm y hasta 5 mm en algunos casos, mientras que los otros dos promedian los 0,5 mm. Algunos piroxenos son de mayor tamaño también, pero los olivinos se mantienen en general cerca del promedio. El resto es masa fundamental y contiene plagioclasas (21%), piroxenos (16%), olivinos (9%) y vidrio (6%), todos en un tamaño promedio de 0,1 mm, además de algunos minerales accesorios como esfeno o apatito. La mineralización presente es muy escasa, y se constituye sólo por magnetita (3%) y hematita (1%). Las alteraciones son también casi nulas, salvo por pequeñas zonas de oxidación sobre todo en las plagioclasas, y algunas muestras de iddingsita en ciertos olivinos.

El basalto vesicular (B3) tiene una textura porfídica seriada con masa fundamental vitrofídica. Es altamente vesicular y localmente glomeroporfídica. En promedio el 58% del espacio es ocupado por las vesículas y sólo un 20% corresponde a los fenocristales. Éstos son plagioclasas (12%), olivinos (6%) y piroxenos (2%). Las primeras tienen un tamaño promedio de 1 mm y una desviación estándar de hasta 4 mm. Los olivinos se mantienen más homogéneos rondando el mm,

y los piroxenos tienen una media aproximada de 1 mm también pero bastante más variable. Las vesículas promedian un tamaño de 3x3 mm las más regulares y alcanzan hasta 8 mm otras más alargadas. La masa fundamental ocupa un 20% y se distribuye entre vidrio (13%), plagioclasas (3%), olivinos (2%) y clinopiroxenos (2%). Se observa una mineralización del 2% constituida exclusivamente por magnetita, y ocupando principalmente los espacios de las vesículas. Muestra leves signos de oxidación y algunos olivinos con iddingsita.

Tabla 3.1: Tabla resumen con los porcentajes de minerales en cada muestra.

Muestra	Andesita (A1)	Basalto (B2)	Basalto Vesicular (B3)
Fenocristales	42%	44%	20%
Plagioclasa	20	33	12
Sericita	10	-	-
Piroxeno	5	4	2
Anfíbol	2	-	-
Calcita	2	-	-
Epidota	2	-	-
Clorita	1	-	-
Olivino	-	7	6
Masa Fundamental	49%	52%	20%
Plagioclasa	36	21	3
Piroxeno	10	16	2
Anfíbol	3	-	-
Olivino	-	9	2
Vidrio		6	13
Mineralización	9%	4%	2%
Magnetita	7	3	2
Hematita	2	1	-
Esfalerita	<1	-	-
Calcopirita	<1	-	-
Vesículas	-	-	58%
Total	100%	100%	100%

3.1.3. Análisis por DRX y FRX

Para verificar los estados de alteración de cada roca y encontrar minerales o fases argílicas no diferenciadas ópticamente, se realizó un análisis de DRX a partir de un pulverizado fino. La información entregada se visualiza en un difractograma, donde el eje “y” representa la intensidad en conteos por segundo (cps), y el eje “x” indica el ángulo de Bragg medido en grados.

El difractograma de la muestra A1 muestra una gran coincidencia con lo observado y descrito previamente, salvo por la presencia de cuarzo. Éste no se logra distinguir a simple vista, por lo que puede ser asociado a una minúscula aparición junto a la sericita y dar lugar a una alteración fílica en desmedro de una sericítica, como se había descrito en un principio (Figura 3.1).

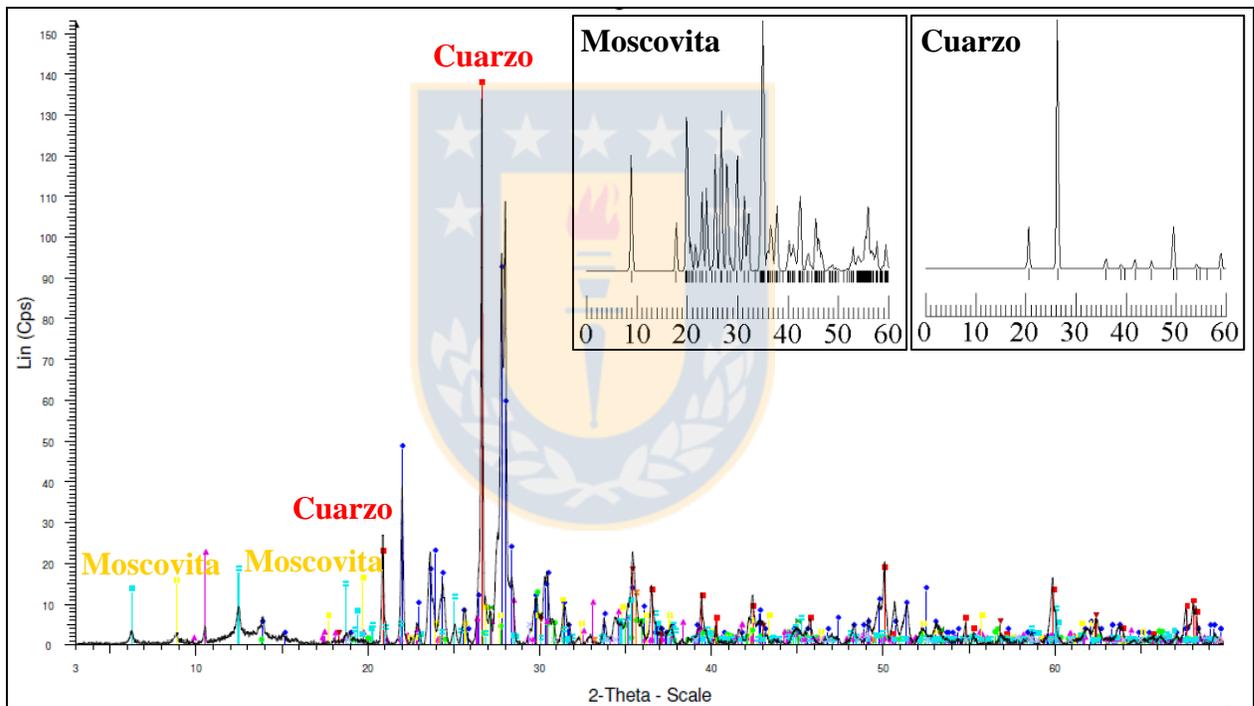


Figura 3.1: Difractograma muestra A1. Se reconoce anortita, cuarzo, piroxeno, anfíbol, moscovita, clorita, magnetita, hematita, esfalerita y calcopirita. Difractogramas individuales de ocw.uniovi.es según base de datos JCPDS. Simbología completa en Anexo N° I.

Las muestras B2 y B3 no muestran diferencias con lo visto en microscopio, pero sí entregan algo más de detalle con respecto a los minerales presentes, principalmente con miembros de soluciones sólidas distintas. En el caso de B2 se observa más variedad para la serie del olivino, mientras que para B3 se muestra una mayor variedad para la serie de los piroxenos (Figuras 3.2 y 3.3).

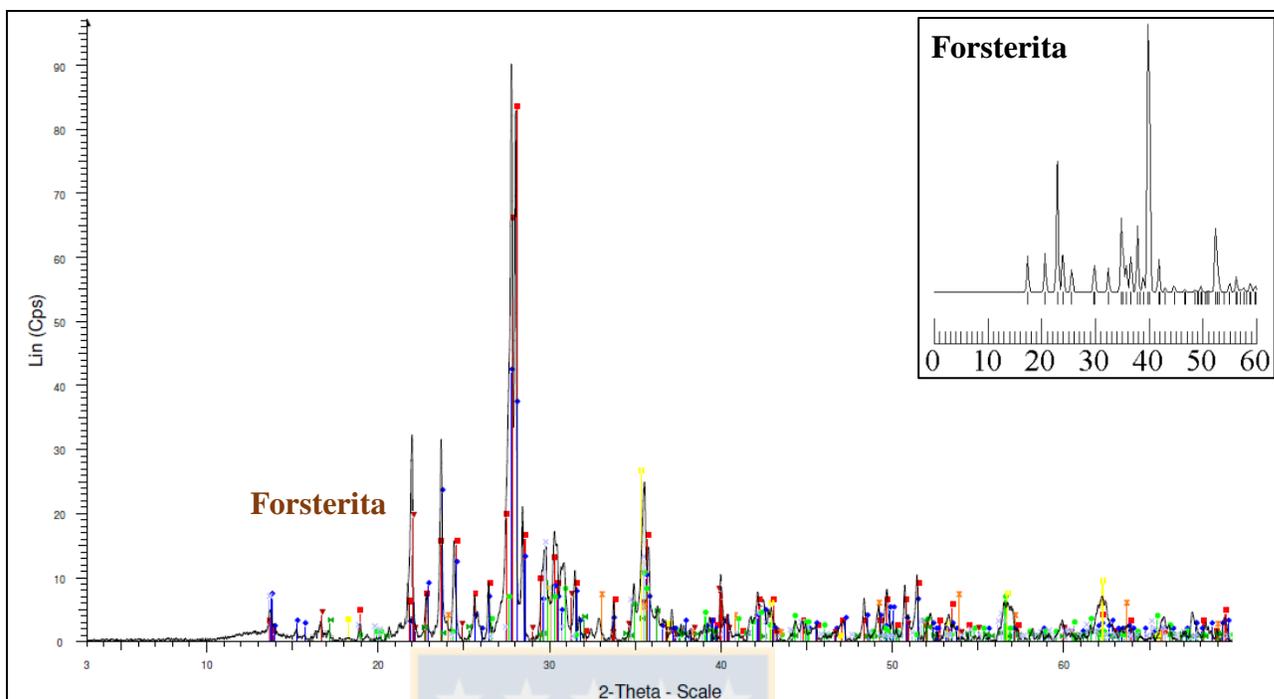


Figura 3.2: Difractograma muestra B2. Se reconoce anortita, diópsido, olivino (fayalita-forsterita), piroxeno, magnetita, hematita. Difractograma individual de ocv.uniovi.es según base de datos JCPDS. Simbología completa en Anexo N° I.

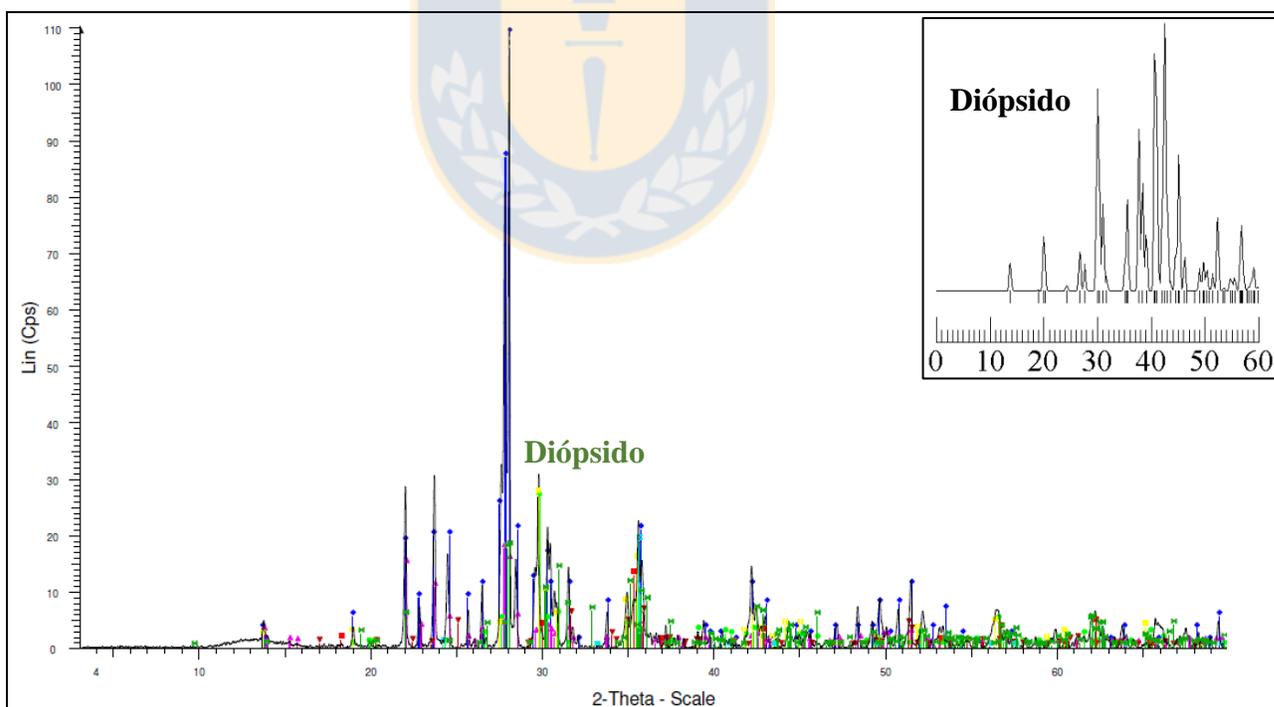


Figura 3.3: Difractograma muestra B3. Se reconoce anortita, piroxeno (diópsido-augita), olivino, magnetita, hematita. Difractograma individual de ocv.uniovi.es según base de datos JCPDS. Simbología completa en Anexo N° I.

Finalmente para respaldar la clasificación y confirmar por medio de los elementos mayores la litología antes descrita, se realizó un análisis por FRX que muestra la cantidad porcentual en masa de los elementos en cada muestra. Estos valores comparados con las medidas promedio de Le Maitre (1976) ratifican lo descrito para la andesita A1 y los basaltos B2 y B3 (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Análisis FRX porcentual de elementos. Los valores promedio son extraídos de Le Maitre, 1976.

Elemento	Andesita Promedio	Basalto Promedio	A1	B2	B3
Na ₂ O	3,53	2,96	4,19	4,37	4,08
MgO	3,37	6,84	3,49	5,00	4,48
Al ₂ O ₃	17,24	15,99	19,66	17,99	17,77
SiO ₂	58,70	49,97	57,28	51,41	51,38
P ₂ O ₅	0,21	0,35	0,33	0,27	0,22
K ₂ O	1,64	1,12	1,91	1,90	1,66
CaO	6,88	9,62	5,90	8,58	9,54
TiO ₂	0,88	1,87	0,96	1,05	1,28
MnO	0,14	0,2	0,09	0,15	0,15
Fe ₂ O ₃	3,31	3,85	5,74	8,82	8,55

3.2. Análisis Cuantitativo Microestructural (QMA)

Los resultados del Análisis Cuantitativo Microestructural, entregan parámetros geométricos de los elementos de la andesita en el espacio. Si bien una estructura es entendida como una falla, una diaclasa o un pliegue, pero en este caso, a nivel microscópico, para efectos de este método se utiliza la definición de estructura “cantidad de todos los datos geométricos de un cuerpo geológico entendido” de Sander en 1950. Esto dirige los resultados hacia un carácter descriptivo más geométrico que estructural, como lo es la orientación de los microcuerpos (minerales) y su distribución en el espacio.

Este análisis se realizó en la Universidad de *Freiberg* siguiendo la metodología del profesor Oleg Popov explicado en el paper “Aporte a la matemática petrográfica. Caracterización de la microestructura para la evaluación de rocas sólidas, en términos de su tratamiento y características del producto” (Popov, 2007). En dicho trabajo mencionan el procedimiento a seguir con una roca para darle valor matemático a sus características microestructurales.

El primer paso es reducir la muestra de roca a una forma cúbica, para luego cortar tres secciones delgadas ortogonales entre sí en cada uno de los tres ejes de coordenadas. Estos cortes son divididos

esquemáticamente en secciones de igual tamaño para un barrido detallado de conteo de puntos en el microscopio óptico. La información obtenida en cada sección es ingresada en una plantilla de entrada de datos como la de la Figura 3.4 (b).

La disposición de los tres cortes ortogonales de la andesita se muestra en la Figura 3.4 (a), donde el corte Zx corresponde a la cara A del cubo, el corte Zy a la cara B y el corte Yx a la cara C. Cada uno es analizado en el *software* controlador, para luego obtener datos de distribución espacial de los componentes en tres dimensiones.

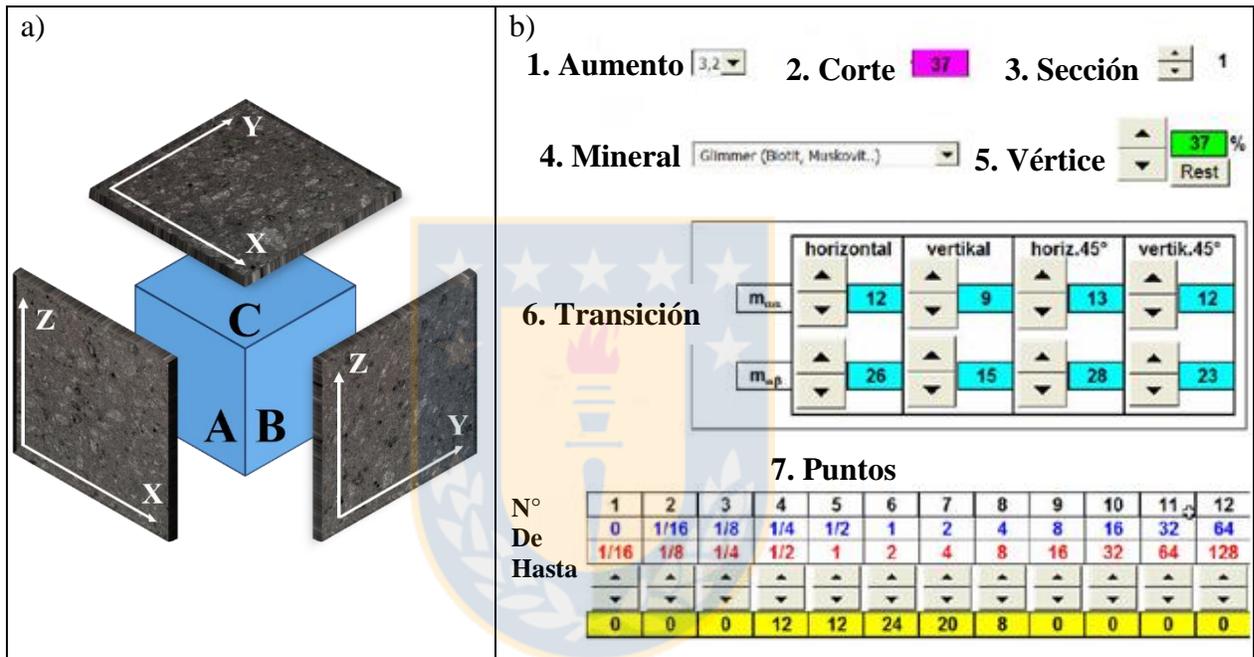


Figura 3.4: a) Disposición cortes ortogonales de andesita. b) Plantilla de entrada de datos, modificado de Popov (2007).

Lo primero que se ingresa en la planilla es el aumento microscópico de trabajo en el campo **1**. Para determinarlo el número de granos visibles de la fase estudiada debe ser entre 10 y 20, y el grano de mayor dimensión de la fase no puede ser más grande que el campo de visión. Si hay una diferencia de tamaño demasiado notoria, el conteo de puntos debe hacerse con dos aumentos distintos. El campo **2** indica el número del corte y el **3** el número de la sección que se está analizando. El campo **4** es donde se selecciona el mineral en estudio. El campo **5** corresponde al número de puntos compartidos por las secciones en que se dividió el corte, es decir, corresponde al número de vértices dentro de la cuadrícula.

Las cuadrículas de los campos **6** y **7** corresponden al ingreso del conteo de puntos propiamente tal. En el primero (**6**) se coloca el número de cambios de fase a lo largo de una línea recta considerando cuatro direcciones distintas (0° , 45° , 90° y 135°). Se hace la distinción entre cambios de fase $\alpha\alpha$ y $\alpha\beta$, α es la fase en estudio y β es cualquier otra fase. La segunda cuadrícula mencionada (**7**) es para ingresar el número de granos en la sección y especificados por tamaño. Éste está considerado en una escala del 1 al 12, donde el elemento es ubicado según los límites que posee cada escala. Las partículas están indicadas como “cuartos de partícula”, es decir, una partícula que se muestra entera se etiqueta como un 4, una partícula cortada a la mitad por el borde de la sección se considera como 2, y una partícula que se muestra sólo en una esquina (cortada por las otras 3 secciones) se etiqueta como 1.

Estos datos una vez procesados generan gráficos donde se resumen las proporciones de los minerales, las intersecciones de fase y la distribución de tamaño. La Figura 3.5 muestra los resultados del corte Zx, correspondiente a la cara A. Se observa una tabla con números en rojo, verde y azul. Los primeros indican la proporción de las fases en el corte, los segundos muestran la cantidad de intersecciones de fase por dirección considerada, y los últimos indican la cantidad de granos pertenecientes a un determinado tamaño. El estereograma representa el número de intersecciones en una línea de medición de fases por mm de longitud. Éste se muestra bastante homogéneo indicando una distribución pareja de los componentes de la roca y sin alguna orientación privilegiada. Finalmente el histograma resume la distribución de los tamaños indicando la influencia de las plagioclasas (rojo) y los piroxenos (rosa).

Además de los estereogramas obtenidos para el conjunto de fenocristales en cada corte, se generan también otros para cada una de las dos fases considerando las tres secciones delgadas juntas e indicando el grado de orientación. Se observa esto en la Figura 3.7 con una distribución bastante equitativa para las plagioclasas, y con una leve orientación en los piroxenos.

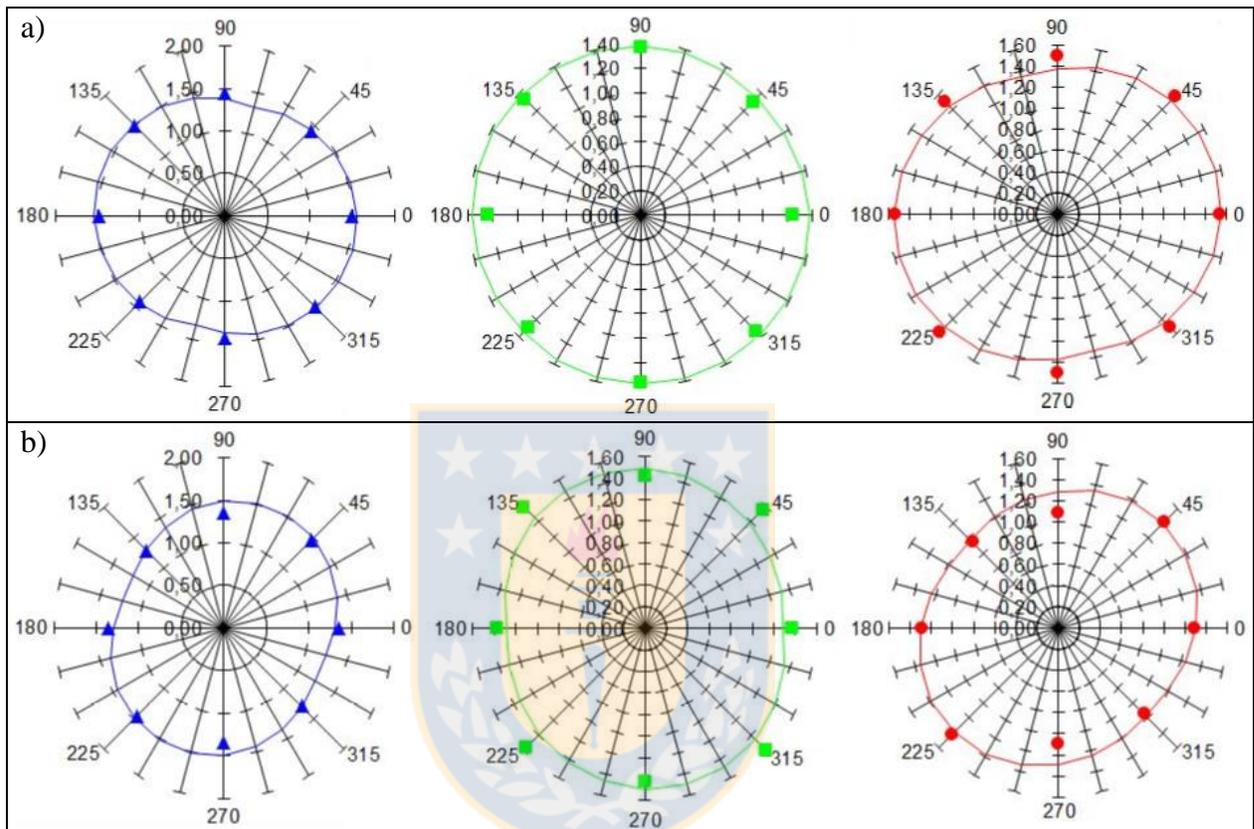


Figura 3.7: Estereogramas que muestran la orientación de las fases por cada corte. a) Feldspatos. b) Piroxenos. El color azul corresponde a la cara a, el color verde a la cara b y el color rojo a la cara c. Los puntos gruesos corresponden al valor por toma de datos, y las líneas delgadas que los unen corresponden a una interpolación.

Considerando luego los resultados conjuntos de las dos fases y los tres cortes, se forma un estereograma que otorga información en tres dimensiones de la orientación y distribución de las partículas de la andesita, con un carácter casi totalmente homogéneo para este caso, muy esperado por lo demás según lo observado previamente (Figura 3.8, a).

El último esquema que entrega el software recopila toda la información geométrica para generar un estereograma con la forma promedio de los granos en la roca. Se aprecia una disposición algo

alargada de los fenocristales característica de las plagioclasas, que son los constituyentes mayoritarios de la roca y por ende quienes afectan más las estadísticas (Figura 3.8, b).

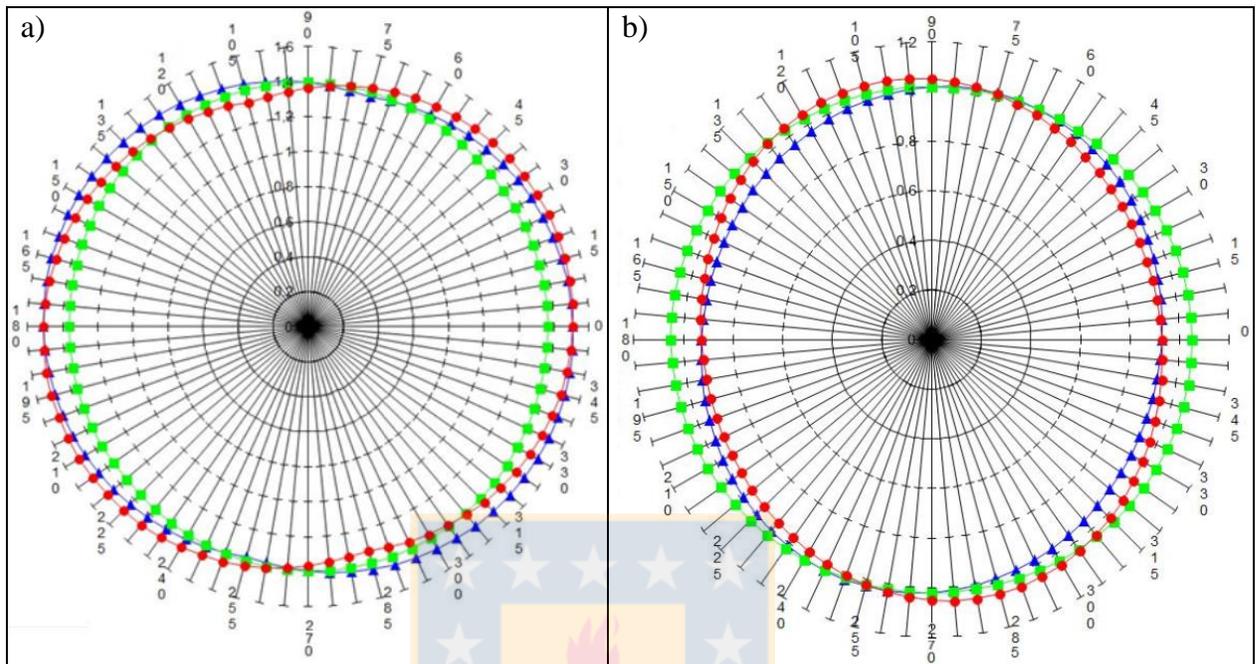


Figura 3.8: a) Estereograma de orientaciones en 3D de los constituyentes de la andesita. b) Estereograma forma promedio de los minerales. El color azul corresponde a la cara a, el color verde a la cara b y el color rojo a la cara c. Los puntos gruesos corresponden al valor por toma de datos, y las líneas delgadas que los unen corresponden a una interpolación.

La información que entregan estos diagramas se reduce a lo expresado en la Tabla 3.3, donde a partir de la descripción de los componentes se intenta estimar los parámetros geométricos de toda la roca. Estos parámetros son observados nuevamente luego de un chancado y comparados con las características de los fragmentos de roca que se producen en él, de forma que posteriormente se puedan correlacionar las estadísticas experimentales de este método, con la ruptura teórica después del proceso de conminución, es decir, que sirvan para intentar predecir las características de la roca luego del chancado. Estas valoraciones matemáticas son obtenidas aplicando fórmulas en plantillas Excel a los conteos realizados en cada sección delgada.

Tabla 3.3: Tabla resumen con los resultados matemáticos del QMA. NDP: Fase no diferenciada

Roca		Tipo: Andesita			Característica Fase				Característica	
		Lugar: Paso Los Libertadores		País: Chile					De la Roca	
Modo		Fases		Símbolo	Unidad	Feldespatos	Piroxeno	Poros	NDP	Σ
		Fracción	Volumen	ϵV	%	21	4	0	75	Microestructuras
Fábrica	Textura	Tamaño	Mediana	$d_{50,3}$	mm	0,654	0,542	-	-	0,624
			Desviación Estándar	σ_{ln}	-	0,368	0,284	-	-	0,352
		Superficie de grano	Superficie Específica	S_V	mm ² /mm ³	7,280	7,770	-	-	7,430
		Forma	Elongación	E	-	1,031	1,324	-	-	1,038
			Aplanado	F	-	1,164	1,126	-	-	1,118
		Rugosidad	Aspereza	K_R	%	21	30	-	-	23
	Estructura	Orientación	Grado de orientación lineal	K_{ln}	%	2	19	-	-	3
			Grado de orientación areal	K_{fl}	%	8	6	-	-	6
			Grado de orientación isotrópica	K_{is}	%	90	75	-	-	91
		Distribución	Agrupamiento	C	%	0	4	-	-	1
Relleno		Grado de relleno	ϵVF	%	-	-	-	-	100	

Se desprenden de esta tabla en primera instancia los porcentajes en volumen de cada fase considerada, que en este caso corresponden a los fenocristales de feldespatos y piroxeno. La clasificación feldespatos agrupa tanto a feldespatos plagioclasas como a feldespatos potásicos, porque estructuralmente se comportan de manera similar, pero en este caso hace sólo referencia a las plagioclasas ya que el feldespatos potásico se encuentra ausente. NDP hace referencia a las fases no diferenciadas que en este caso corresponde a la masa fundamental de la roca, recordando que este método sólo trabaja con los fenocristales.

La segunda parte más extensa de la tabla separa las características por textura y estructura. La primera describe parámetros como el tamaño de grano, su superficie específica, su forma y su rugosidad, mientras que la segunda parte se centra en la orientación de las fases tanto isotrópica como lineal y areal, además de su distribución y la identificación de rellenos en espacios.

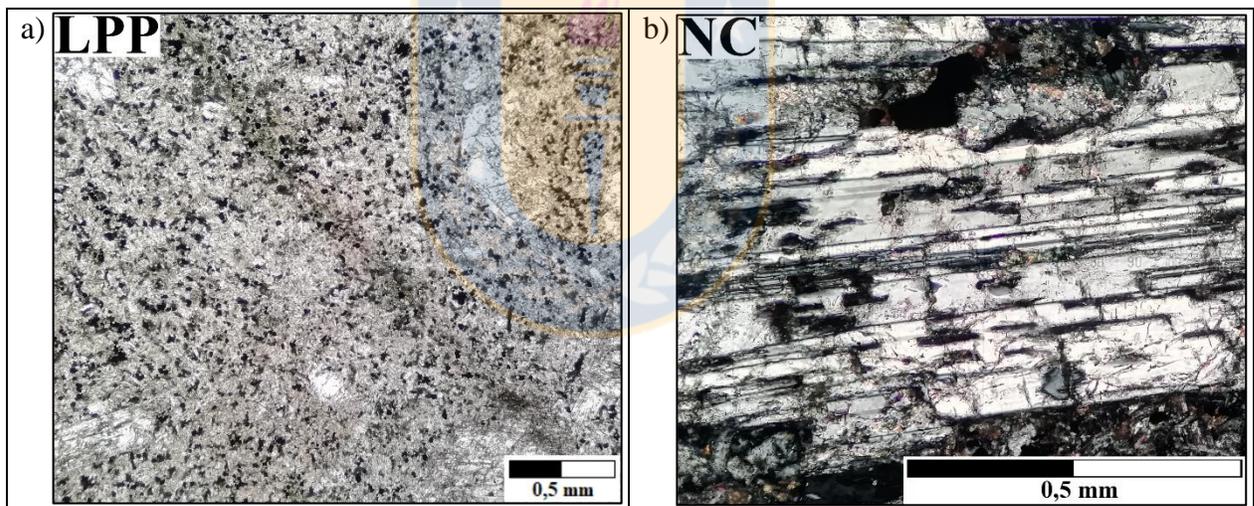
3.3.Descripción Estructural

3.3.1. Descripción Microscópica

El enfoque descriptivo de las estructuras comenzó de forma microscópica ya que macroscópicamente no se observaron indicios de fracturamiento. A este nivel se pueden distinguir

principalmente dos tipos de fracturas según el lugar donde se encuentren, algunas están concentradas sólo en los minerales, siendo de menor longitud pero más abundantes, y otras que recorren tanto los minerales como la masa fundamental abarcando zonas más extendidas. Las primeras poseen en promedio una dimensión micrométrica y se encuentran en todos los cortes de las tres rocas, mientras que las segundas llegan hasta los 20 mm pero aparecen sólo en algunas secciones delgadas. En el caso de la andesita estas “fracturas mayores” se aprecian en Zx y Zy.

El corte Zx muestra una fractura de aproximadamente 20 mm que se propaga en la masa fundamental casi bordeando varios fenocristales por las puntas, y atravesando de forma perpendicular al maclado de algunas plagioclasas. Se distingue además un halo de alteración clorítica a lo largo de todo su recorrido (Microfotografía 3.2, a). Además de ésta, que es la de mayor dimensión en el corte, se observan algunas más pequeñas de hasta 1 o 2 mm que se propagan de la misma forma que la anterior, es decir, cortando perpendicularmente a las plagioclasas (fenocristales) y bordeando granos en la masa fundamental.

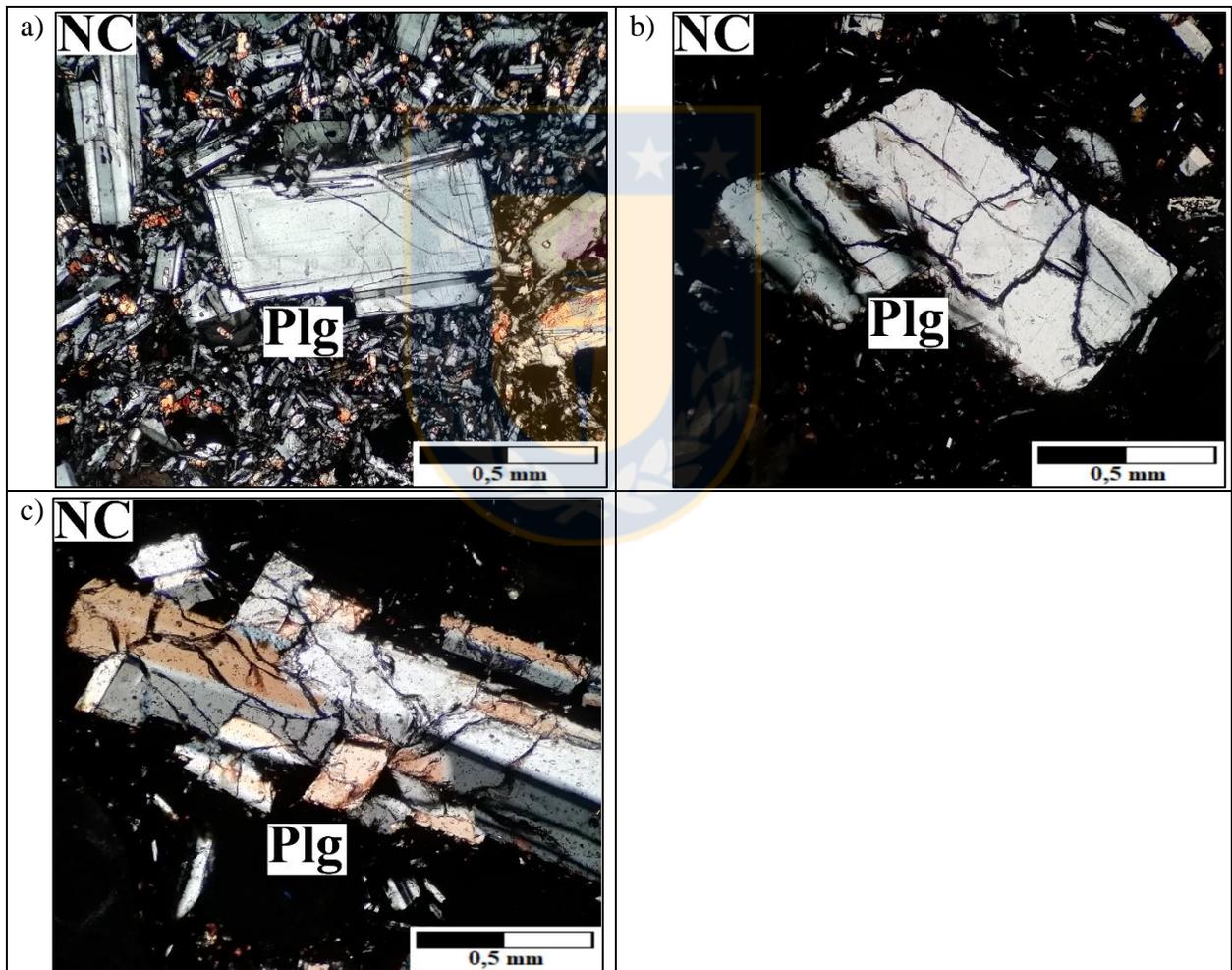


Microfotografía 3.2: a) Fractura mayor de orientación NW – SE y halo clorítico. 50x. b) Microfracturas en las plagioclasas dispuestas principalmente de forma perpendicular entre ellas. Se reconoce clorita en ellas y sericita dispersa. 200x.

En el corte Zy se observan dos fracturas mayores de casi 18 y 20 mm, y otra más pequeña que alcanza los 5 mm, todas con un halo clorítico en sus extensiones. Si bien las tres se propagan bordeando algunos los cristales y atravesando otros de forma perpendicular al maclado, las dos más grandes cortan además las puntas de algunos granos que terminan en ángulo recto.

Las fracturas micrométricas localizadas en los fenocristales de la andesita, sobre todo en las plagioclasas, se encuentran en su mayoría relacionadas con los minerales de alteración en la roca (Microfotografía 3.2, b). La clorita suele presentarse concentrada en éstas, la sericita tiende a dispersarse a partir de ellas, y la epidota se dispone en cúmulos sin estar estrictamente ligada a determinadas fases. Los minerales de mena casi no se localizan en las fracturas, dispuestos de forma más diseminada o centrados en los granos de clinopiroxeno.

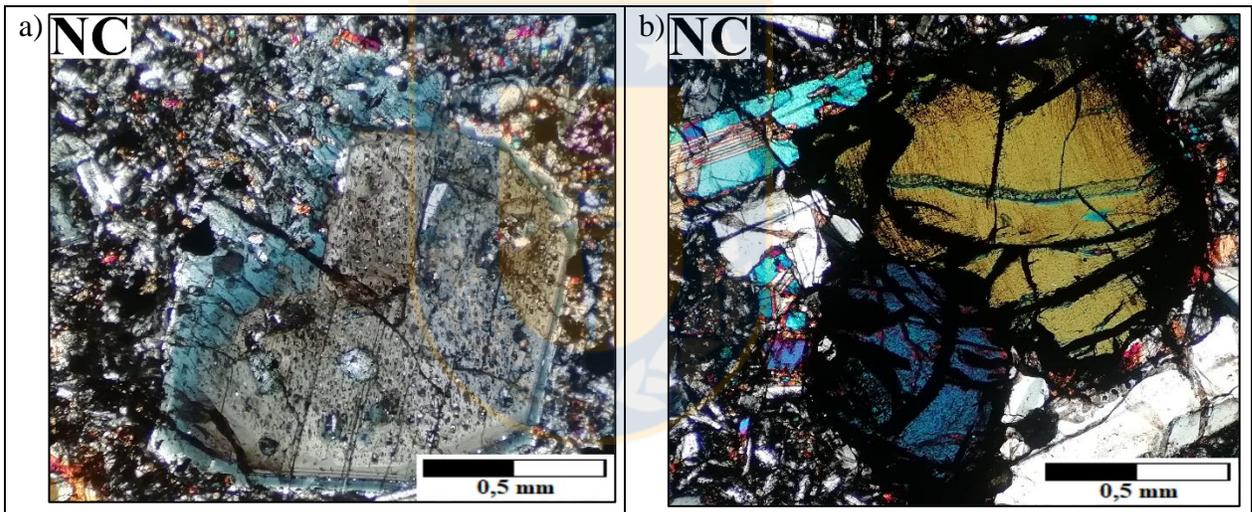
Las fracturas presentes en los fenocristales son definidas como microfracturas, y según su nivel de abundancia permiten clasificar al fracturamiento como bajo, medio y alto. En la Microfotografía 3.3 se muestran los tipos de fracturamiento con plagioclasas como ejemplos.



Microfotografía 3.3: Clasificación del microfracturamiento en fenocristales. a) Fracturamiento bajo. 100x. b) Fracturamiento Medio. 100x. c) Fracturamiento Alto. 100x.

El basalto (B2) muestra un poco más de consistencia al presentar microfracturas concentradas casi exclusivamente en los fenocristales, variando generalmente entre un grado medio y alto salvo por algunos en que se encuentran casi intactos. Estas estructuras presentan cierta tendencia a distribuirse sólo en dos direcciones perpendiculares entre ellas, atravesando generalmente todo el mineral y extendiéndose unos pocos micrones hacia la masa fundamental. No se observa una relación entre las fracturas y la mineralización, y tampoco frente a la leve orientación que poseen los microlitos de la masa fundamental en dos de las secciones (Yx y Zx).

A diferencia de la roca anterior, ésta tiene dos distinciones en los fenocristales de plagioclasas que podrían incidir en una eventual propagación de fracturas. Presentan textura *sieve* en algunos ejemplares y zonación en casi todas (Microfotografía 3.4, a). Los olivinos están altamente fracturados de forma irregular (Microfotografía 3.4, b).

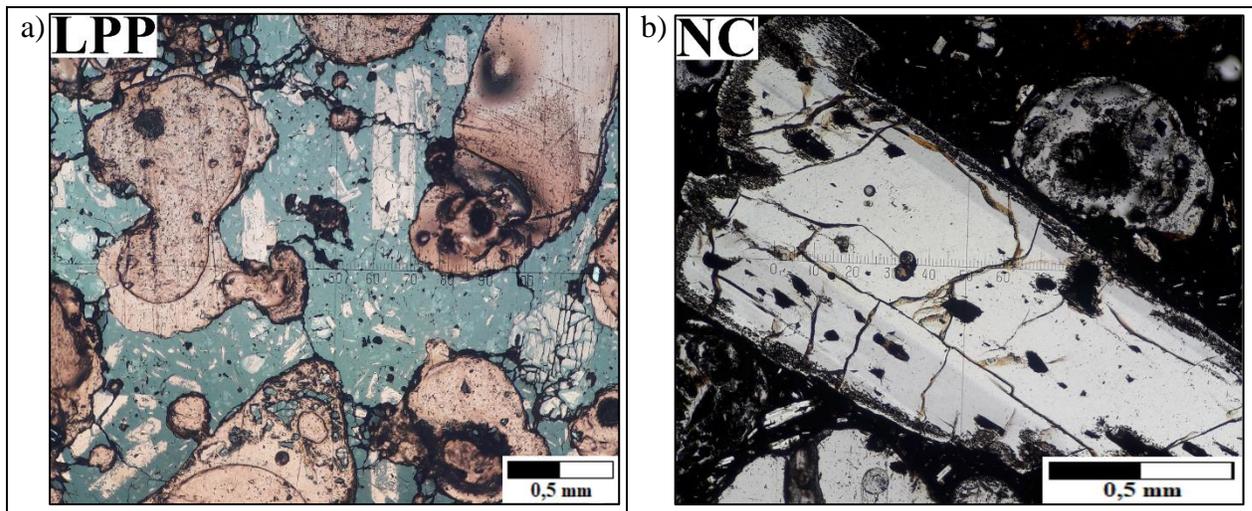


Microfotografía 3.4: a) Plagioclasa con textura *sieve* y zonación. 100x. b) Olivinos con fracturamiento elevado e irregular. 100x.

El basalto vesicular (B3) no muestra grandes fracturas con continuidad debido al gran porcentaje de vesículas en él. Es poco el espacio de roca que queda para que se propaguen, por lo que todas comienzan y terminan en alguna vesícula (Microfotografía 3.5, a). Esta propagación se da a grandes rasgos por dos formas según sea el tamaño del mineral con el que se enfrenta, si son pequeños pasa por el borde, y si son grandes los atraviesa, generalmente paralela o perpendicular al eje más largo del mineral, pero raramente en diagonal.

Las plagioclasas se encuentran en promedio medianamente fracturadas, algunas en un grado mayor, y otras pocas casi intactas. Estas estructuras podrían ser agrupadas en dos familias según la

orientación, las más grandes extendidas a lo largo del maclado, y las más pequeñas perpendiculares a éste (Microfotografía 3.5, b).



Microfotografía 3.5: a) Fracturas conectando las vesículas y atravesando las plagioclasas de forma perpendicular al eje mayor. La foto es con luz reflejada y una leve abertura para luz transmitida, lo que permite ver la silueta de las plagioclasas en el fondo. 50x. b) Plagioclasa con textura *sieve* concentrada en el borde y dos familias de fracturas, paralelas y perpendiculares a la dirección del maclado. 100x.

3.3.2. Descripción Estadística

Las fracturas que se produzcan en la roca durante un proceso de conminución van a estar ligadas a zonas de debilidad dentro de ella, y su propagación va a depender del tipo y disposición espacial de sus constituyentes. Para efecto de las rocas en estudio hablamos principalmente de plagioclasas, piroxenos y olivinos, que corresponden a los fenocristales mayoritarios de una textura porfídica.

En la búsqueda de parámetros que puedan condicionar esta propagación de fracturas, se definieron tipos de interacción entre fenocristales que podrían favorecer o entorpecer este recorrido fisural, entendiendo que los fenocristales son los elementos de mayor tamaño y por ende de mayor influencia durante un proceso de fracturación. Entiéndanse también como zonas de la roca donde se mantiene la misma estructura cristalina y respuesta ante esfuerzos mecánicos, dentro de una masa fundamental más heterogénea con distintos componentes más pequeños.

Estos tipos de interacción son esquematizados en la Figura 3.9 a y b, donde se observan dos interacciones con contacto (punta y arista), y dos interacciones sin contacto pero cercanas (canal punta y canal arista). Una repetición constante de alguno de estos tipos podría permitir trazar

recorridos de fracturamiento y extrapolarlos al comportamiento general de la roca. En la Microfotografía 3.6 se muestra de forma práctica cómo son estas interacciones vistas a través del microscopio óptico.

Una vez definidos estos parámetros de descripción, se llevó a cabo un análisis estadístico por secciones de los granos, considerando el tamaño, la forma, el grado de fracturamiento, la orientación de las fracturas, su relación con las alteraciones y su tipo de interacción con los granos cercanos. Cada corte fue dividido en 15 secciones, y en cada sección se seleccionaron los 5 fenocristales de mayor tamaño contabilizando un total de 75 granos por corte. Las secciones fueron denominadas A, B y C en la horizontal, y enumeradas del 1 al 5 en la vertical (Figura 3.9, c).

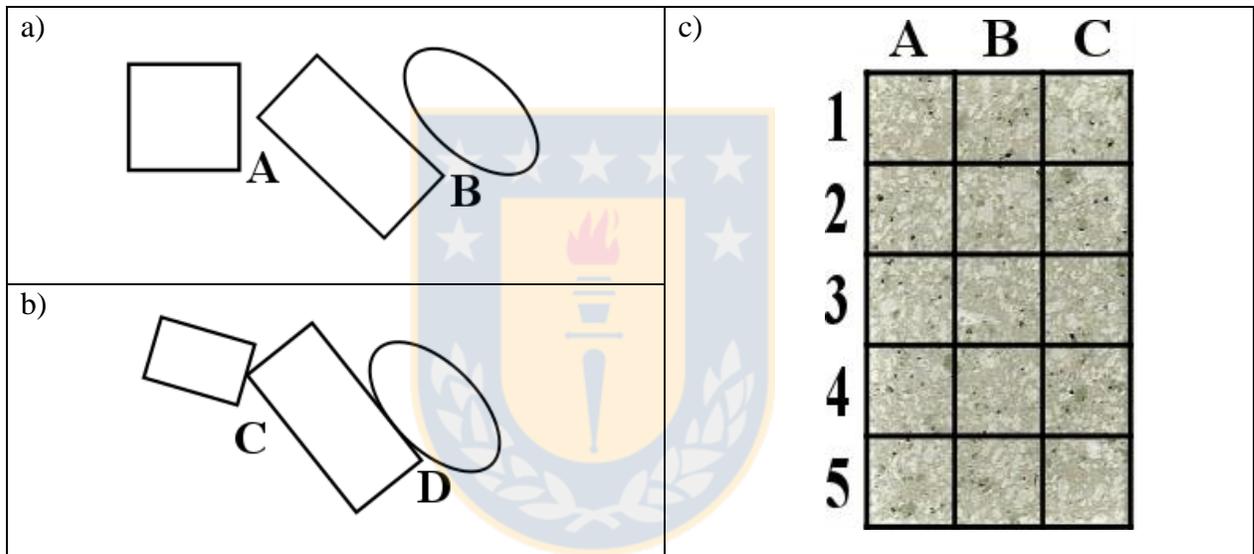
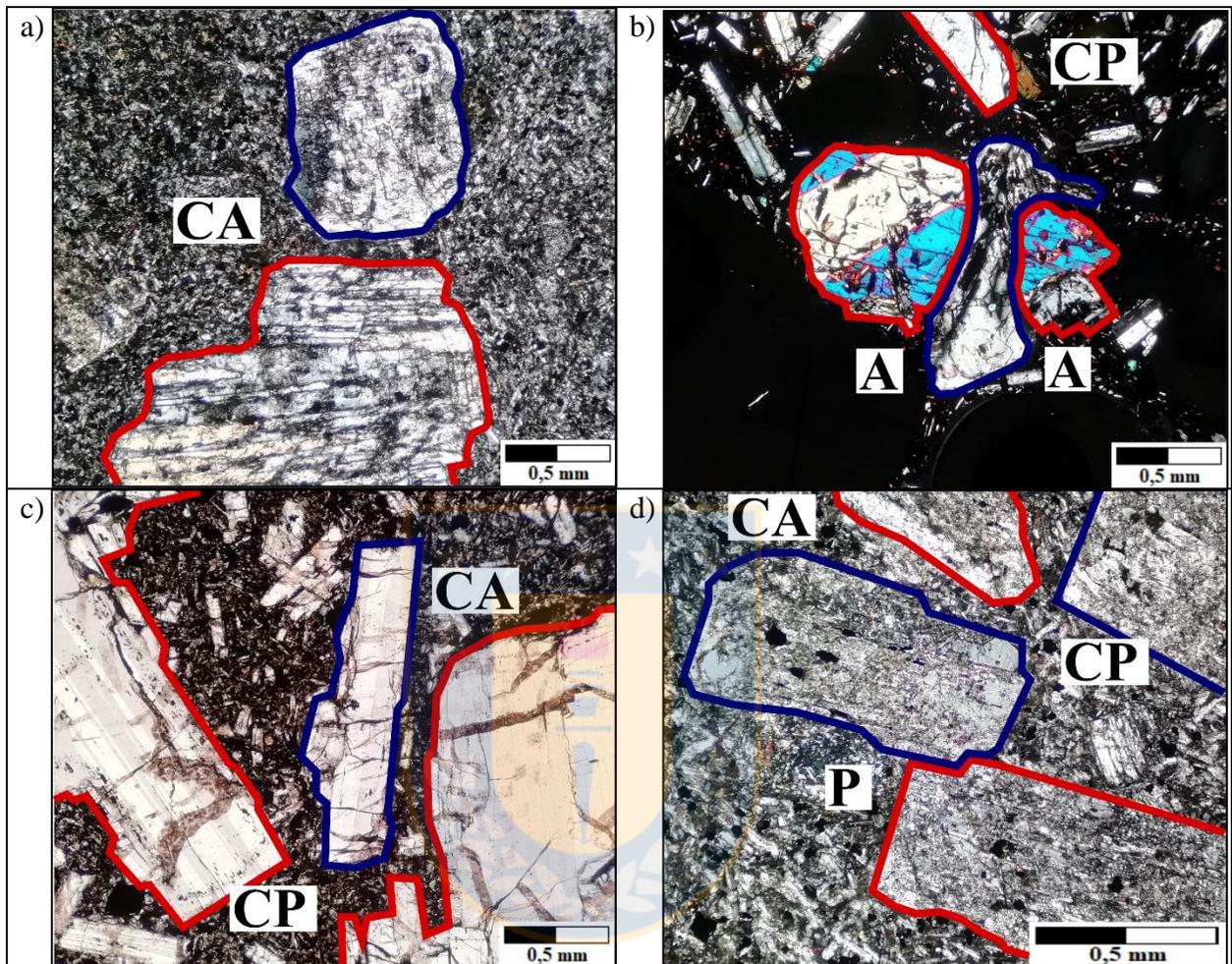


Figura 3.9: a) Tipos de interacción entre granos cercanos sin contacto. A canal punta. B canal arista. b) Tipos de interacción entre granos en contacto. C punta. D arista. c) Cuadrícula representativa de la división en secciones de cada corte transparente para su estudio estadístico.

La Tabla 3.4 corresponde a un extracto de la información recopilada donde aparecen sólo los datos de la sección A1. El resto de los datos son adjuntados en el Anexo N° II. La forma hace referencia a si el grano mineral se observa anhedral (A), subhedral (S) o euhedral (E). El grado de fracturación es indicado como bajo, medio o alto. La orientación describe si existe alguna dirección preferencial de las fracturas dentro del fenocristal, siendo la terminología PM para cuando se encuentran perpendiculares al maclado, M para cuando se disponen mayoritariamente paralelas a las maclas, y N cuando no existen preferencias de orientación o no se logran distinguir. El dominio expresa si hay primacía de fracturas o alteración. La última columna corresponde a los tipos de interacción mencionados en la Microfotografía 3.6, donde se registran con un número al final según las

cantidades de ese tipo de interacción que presente el grano. Una nomenclatura CP2 es entendida como un fenocristal que tiene 2 interacciones del tipo “canal punta”.



Microfotografía 3.6: Interacciones a través de microscopía óptica. a) Interacción canal arista entre dos plagioclasas de la andesita. NC. 50x. b) Interacción canal punta en la parte superior entre dos plagioclasas, y dos interacciones arista en el medio entre plagioclasas. Basalto vesicular (B3). NC. 50x. c) Interacción canal arista en la derecha y canal punta en la izquierda. Basalto (B2). LPP. 50x. d) Interacción canal arista zona superior, dos canales punta en la derecha y una interacción punta en el medio. Andesita. NC. 100x.

Para el caso de los basaltos que evidencian una escasa alteración y muestran vidrio en la masa fundamental, se reemplaza la columna “dominio” por “vidrio”, indicando si el fenocristal tiene (S) o no tiene vidrio (N), si es poco (P), o si se concentra sólo en los bordes (B). En el basalto vesicular (B3) se agrega además una columna con el número de interacciones del grano con una vesícula.

Tabla 3.4: Ejemplo de la planilla de entrada de datos para describir los granos de un corte. Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Dominio: F-Fractura, A-Alteración. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

Zona	Mineral	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Dominio	Interacción
A1	Plg	1x0,5	S	Medio	PM	F	N
A1	Plg	1,1x0,5	S	Medio	N	A	CP1
A1	Plg	1x1	E	Bajo	N	A	CA1
A1	Plg	0,6x0,5	S	Alto	N	A	A1
A1	Plg	1,4x0,6	S	Alto	N	A	CA1

Una vez descritos los fenocristales en los 9 cortes de las 3 rocas, se resumieron los parámetros contados de forma porcentual en la Tabla 3.5. En ella se observa que la andesita (A1) es quien presenta el mayor estado de fracturamiento previo al chancado, con casi todos los granos altamente fracturados e invadidos por las alteraciones. Esto último impidió observar de mejor manera la orientación de las fracturas dentro de ellos, e influyó en la prevalencia de cristales subhedrales por sobre el resto. Finalmente los tipos de interacciones son principalmente del tipo canal, 36% canal punta y 23% canal arista, esto indica que los fenocristales en general no tienen tanto contacto entre ellos, y que el posible camino de fracturas que más se repetiría es a través de las puntas de los granos.

El basalto (B2) se muestra menos alterado que la andesita, donde si bien la falta de alteración permite ver de mejor manera las fracturas, y estas son principalmente medias - altas, los granos se encuentran en su mayoría aún enteros conservando una forma euhedral. La orientación de las fracturas tiende a separarse en dos grupos, uno con orientaciones perpendiculares al maclado en las plagioclasas, y otro más irregular en los olivinos. Hay una leve superioridad de los granos que no poseen vidrio, y la distribución de los tipos de interacción es pareja, pero destaca por sobre el resto el tipo arista.

Tabla 3.5: Porcentajes totales para cada roca de los parámetros descriptivos medidos. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

Característica	Tipo	Andesita (A1)	Basalto (B2)	Basalto Vesicular (B3)
Mineral	Plagioclasa	94	86	86
	Piroxeno	6	5	2
	Olivino	0	9	13
Forma	Anhedral	11	12	10
	Subhedral	62	24	36
	Euhedral	27	63	54
Fracturación	Alta	78	49	56
	Media	16	39	26
	Baja	7	12	17
Orientación	PM	21	39	35
	M	0	2	22
	N	79	52	51
Dominio	Fractura	34	-	-
	Alteración	66	-	-
Vidrio	Si	-	45	49
	No	-	55	51
Interacción	CA	23	22	8
	CP	36	24	16
	A	22	30	26
	P	14	16	7
	N	5	8	42
Vesícula	Promedio	-	-	2,5

El basalto vesicular (B3) es la roca que tiene el menor porcentaje de fenocristales, y eso se manifiesta en los tipos de interacción de granos donde la prevalencia es que no tengan cercanía entre ellos. Estos se encuentran en general bastante fracturados y conservando la forma, además de mostrar una distribución equitativa entre quienes tienen vidrio y los que no. Finalmente se agrega

un campo para caracterizar el contacto con las vesículas, donde destaca un promedio de 2,5 interacciones por grano.

En este caso las vesículas toman importancia, ya que al ser espacios vacíos son de por sí zonas de debilidad a la hora de romper la roca, de manera que los cortes fueron escaneados y procesados con el editor de imágenes ImageJ para obtener porcentajes más precisos (Figura 3.10).

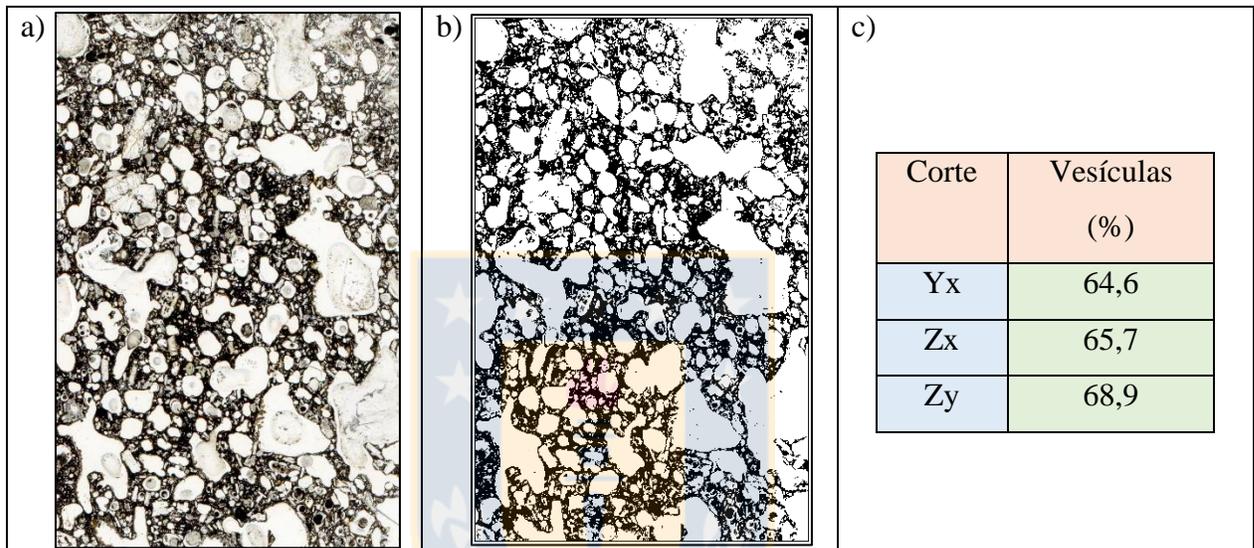


Figura 3.10: a) Corte Yx escaneado del basalto vesicular. b) Imagen en blanco y negro del corte Yx obtenido en ImageJ. A partir de esta imagen se obtiene el porcentaje de vesículas representadas por el color blanco. c) Tabla con los porcentajes de vesículas para los 3 cortes.

3.3.3. Descripción QEMSCAN® y SEM

Los últimos métodos utilizados son los sistemas QEMSCAN® y SEM, donde se tomaron fotografías en alta resolución de los cortes para observar las microfisuras. Con el primero se obtuvieron imágenes de electrones retrodispersados (BSE) (Figura 3.11) y con el segundo imágenes de electrones secundarios (SE).

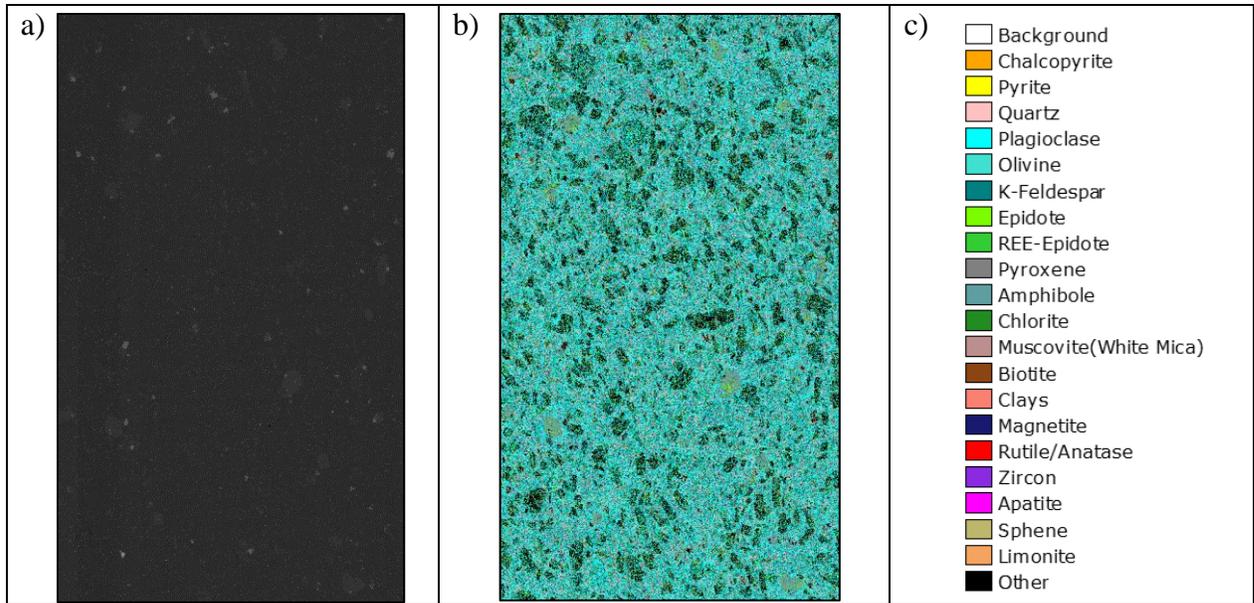


Figura 3.11: a) Ejemplo de una imagen de electrones retrodispersados, correspondiente a un barrido completo del corte de andesita Xy. b) Imagen en falso color del barrido retrodispersado indicando las composiciones de las fases minerales. c) Leyenda de los colores utilizados en la imagen de falso color.

Hacer un escaneo completo del corte no es fácil por el nivel de resolución que se necesita para obtener imágenes bien explicativas, por lo que se eligieron 9 posiciones bien distribuidas donde se tomaron fotografías a través de 3 métodos diferentes y se comparó su eficacia. Imágenes BSE, SE y con el microscopio óptico.

En la Microfotografía 3.7 se muestran pares de imágenes en la misma posición de un corte, pero con distinta técnica, SE a la izquierda y BSE a la derecha. Hay 3 pares correspondientes uno a cada roca en estudio, a y b son de andesita (A1), c y d del basalto (B2), e y f del basalto vesicular (B3).

El objetivo principal de los electrones retrodispersados (BSE) es determinar la composición mediante la captación de números atómicos, mientras que los electrones secundarios (SE) se encargan de reflejar en una imagen la superficie de la muestra. Si bien la finalidad de cada método es distinto, en ambos se pueden ver definidas las microfracturas del corte a gran aumento, pero se observan con mayor nitidez en las imágenes SE.

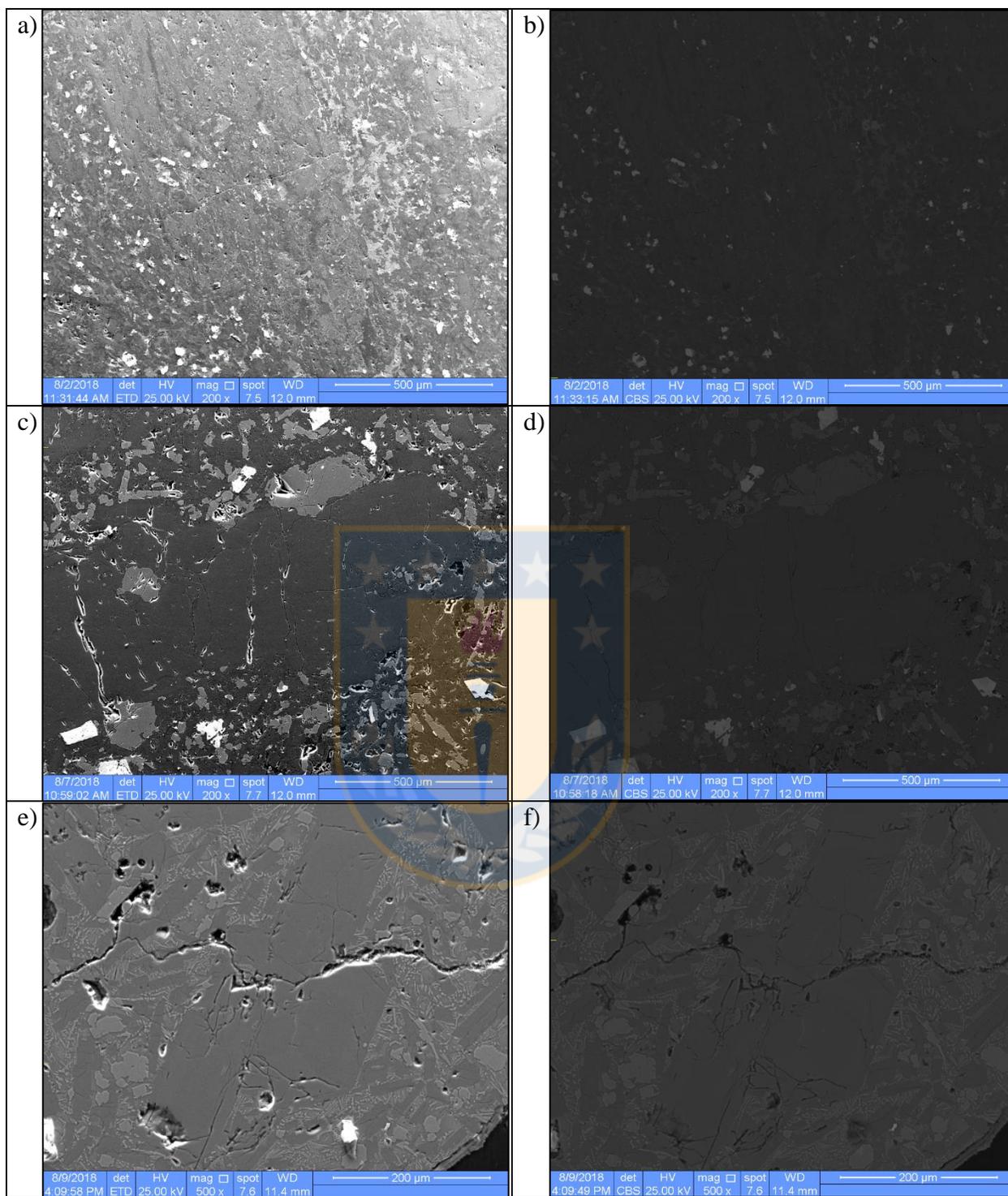
Mediante BSE las fracturas se distinguen con unos colores negros y poco contrastables con el color gris oscuro que presentan los minerales, en este caso la plagioclasa. A diferencia del SE donde las

fracturas se muestran con un abanico más amplio de tonalidades, principalmente negra en el centro y más blanquecina hacia los bordes, como una especie de halo, esto debido a las diferencias de profundidad que se generan hacia los bordes de la fisura. Esto último se distingue bien en la Microfotografía 3.7 (e), donde una plagioclasa del basalto vesicular es cortada casi de forma perpendicular a su eje mayor o dirección de maclado. En las fotografías de las otras dos rocas se observa este mismo carácter perpendicular de las fracturas pero esta vez restringidas solamente al fenocristal.

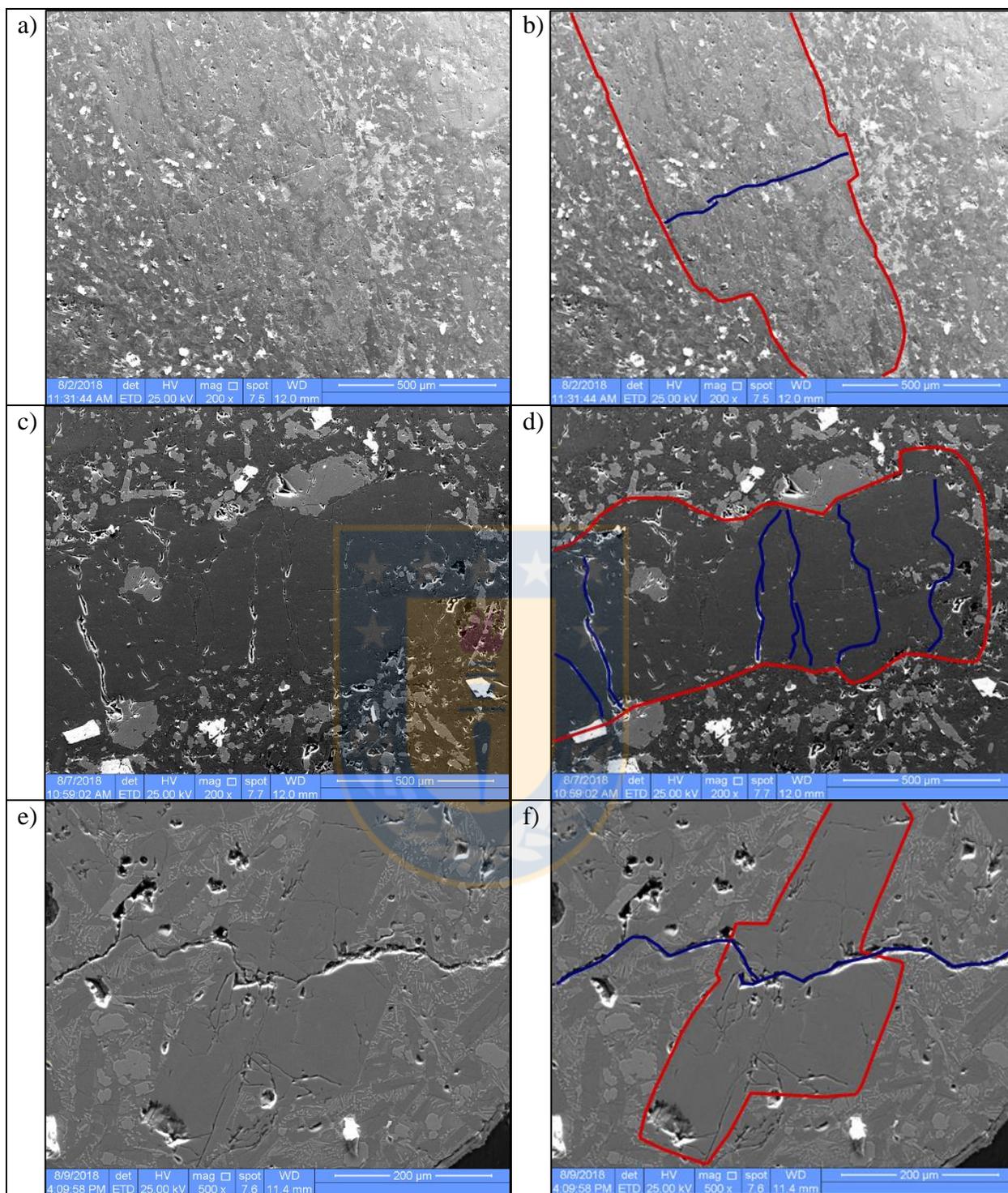
En la Microfotografía 3.8 aparecen las mismas tres imágenes SE de la Microfotografía 3.7, pero esta vez recalcando los límites de los fenocristales y las fracturas más distinguibles. Edición hecha a mano a través del programa Inkscape 0.91.

La última comparación de imágenes es entre SEM y microscopía óptica, donde destaca por sobre todo la limpieza respecto a las alteraciones con que se observan las fracturas en las imágenes SEM. Esto es más notorio en la andesita ya que es precisamente la roca más alterada (Microfotografía 3.9).

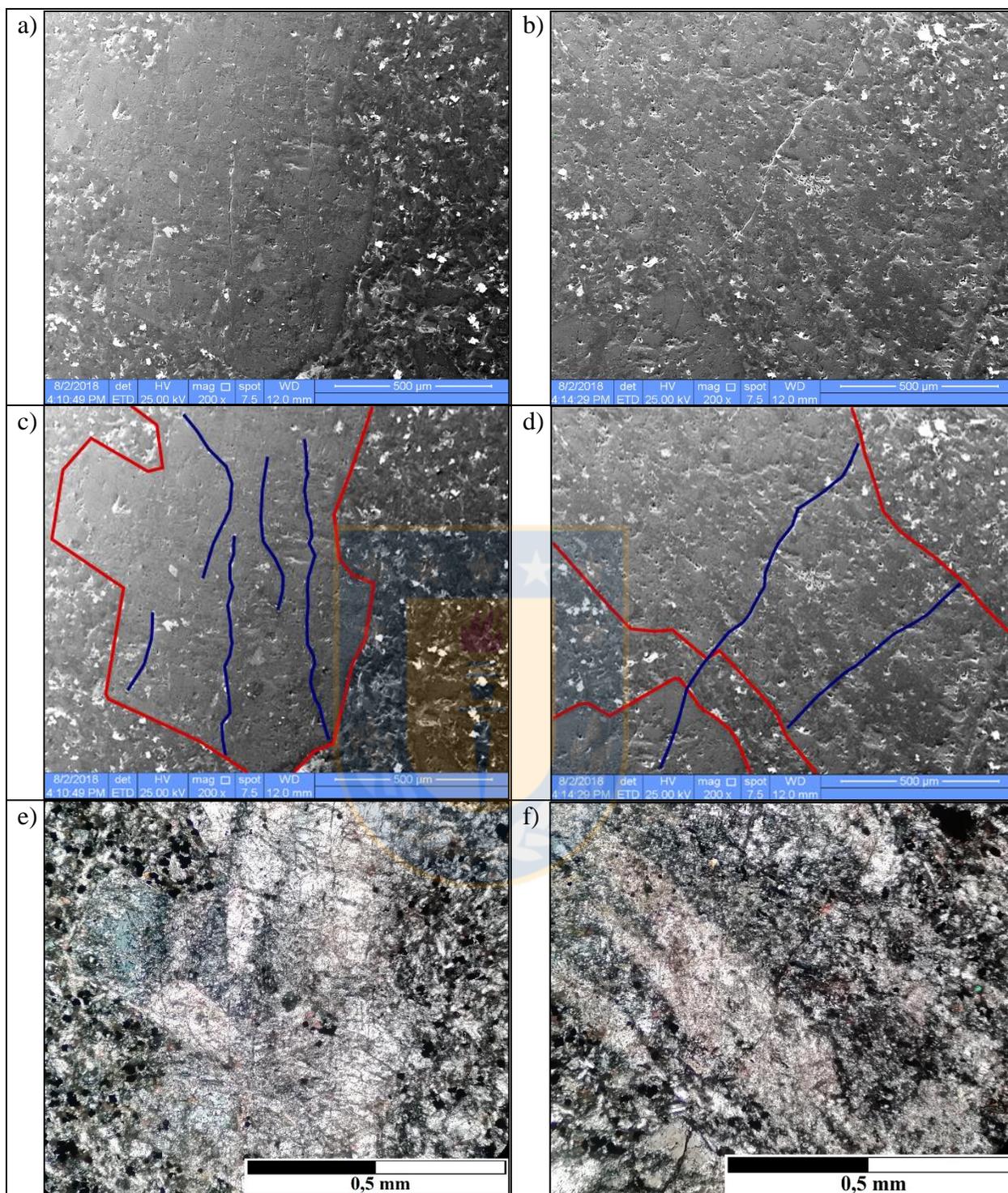




Microfotografía 3.7: (a), (c) y (e) imágenes SE. (b), (d) y (f) imágenes BSE. (a) y (b) andesita Yx 200x. (c) y (d) basalto Yx 200x. (e) y (f) basalto vesicular Zy 500x.

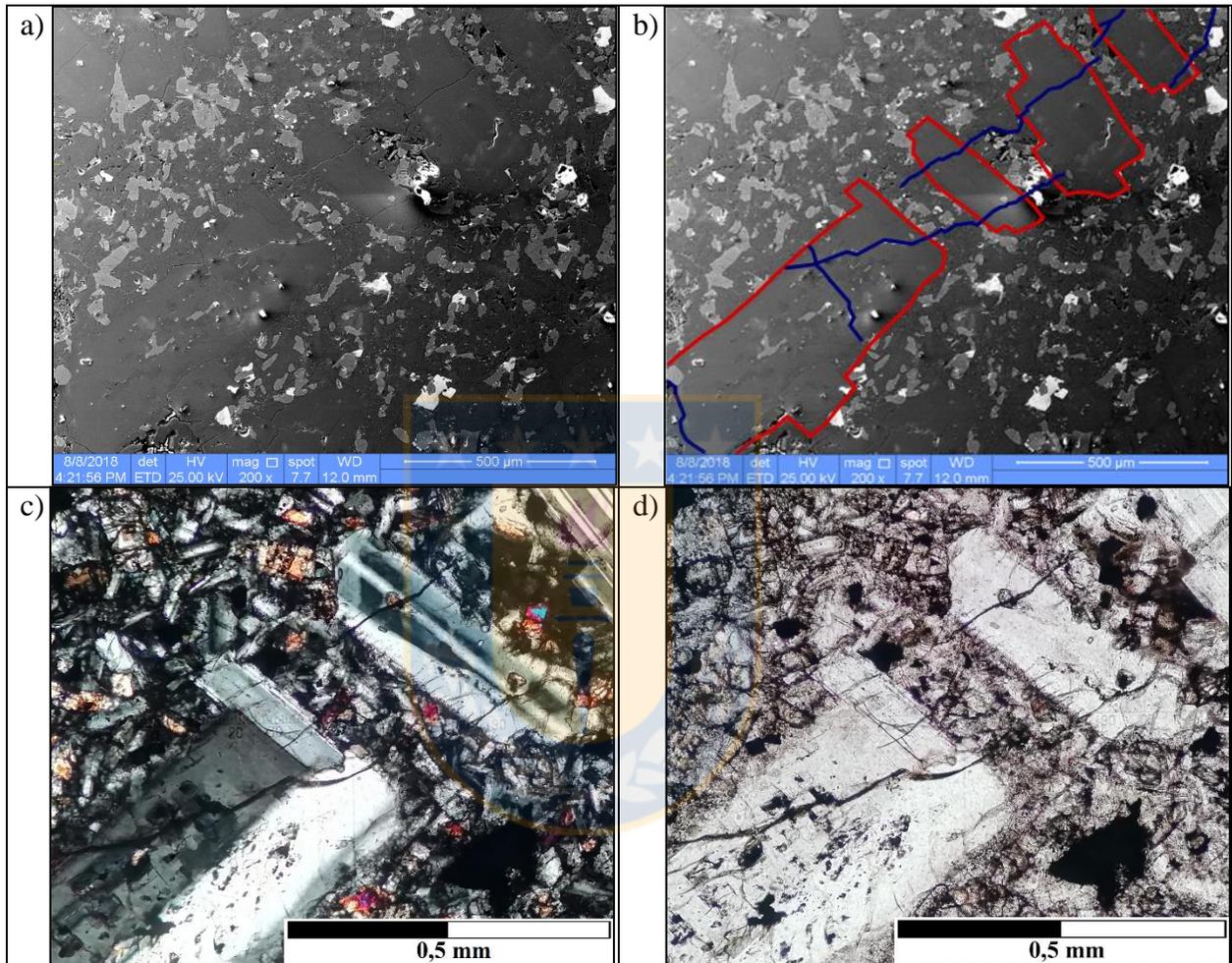


Microfotografía 3.8: (a), (c) y (e) imágenes SE. (b), (d) y (f) imágenes SE modificadas para resaltar microfracturas. (a) y (b) andesita Yx 200x. (c) y (d) basalto Yx 200x. (e) y (f) basalto vesicular Zy 500x. Rojo borde fenocristales. Azul fracturas importantes.



Microfotografía 3.9: (a) y (b) imágenes SEM para plagioclasas de la andesita. (c) y (d) imágenes SEM resaltando bordes minerales y fracturas destacadas. (e) y (f) imágenes en microscopio óptico de las mismas plagioclasas. NC. 200x.

La Microfotografía 3.10 muestra imágenes limpias de alteraciones para el basalto (B2) y cómo las fracturas son más distinguidas en microscopía óptica que la andesita. Se observa también de forma notoria la propagación de fracturas más grandes atravesando perpendicularmente los ejes mayores de los minerales, en este caso alcanzando hasta más de dos fenocristales al hilo.

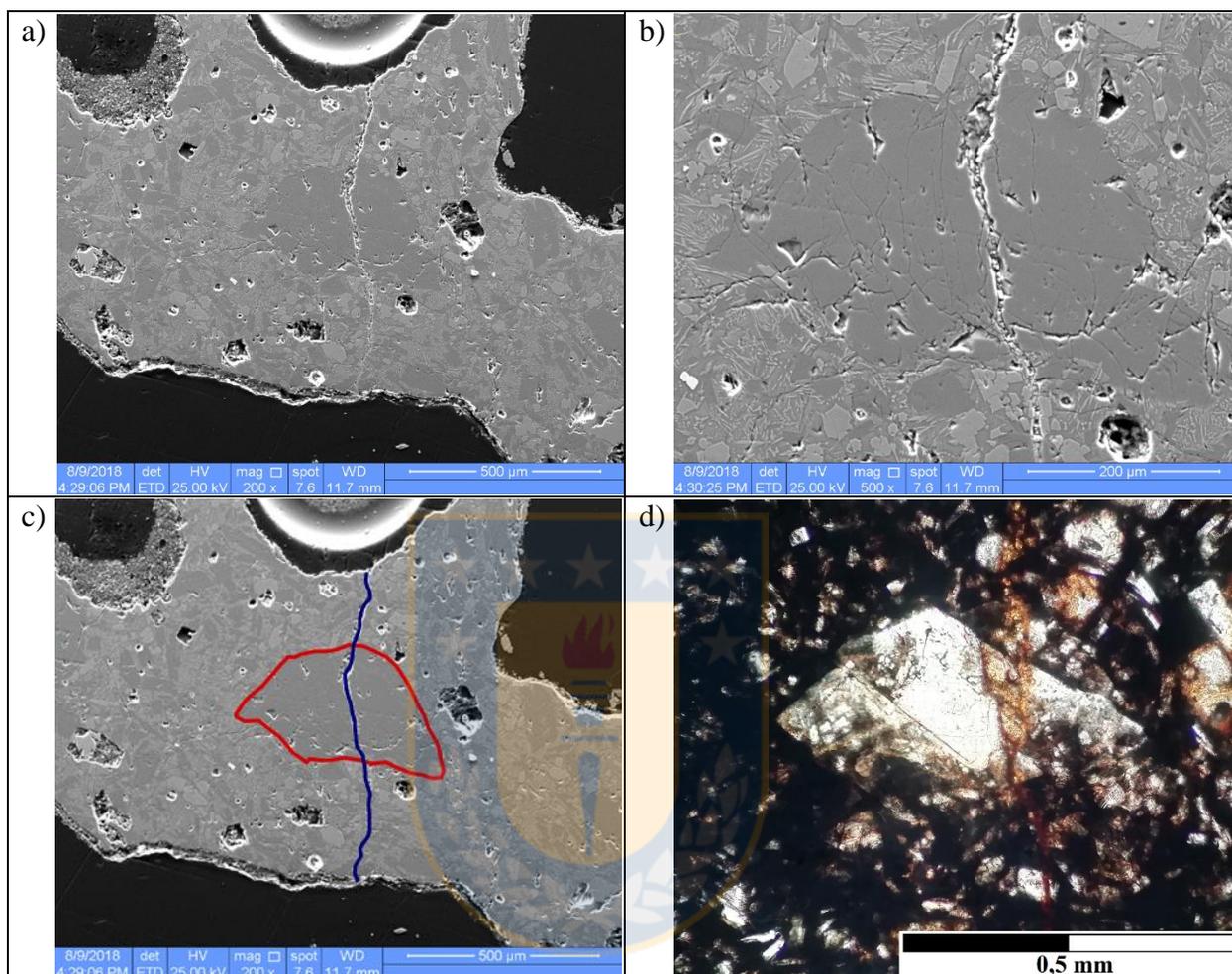


Microfotografía 3.10: (a) y (b) imágenes SEM basalto, la primera sin editar y la segunda con bordes y fracturas marcadas. (c) y (d) imágenes en microscopio óptico 200x. La primera en NC y la segunda en LPP.

La Microfotografía 3.11 destaca el recorrido de una fractura entre dos vesículas y atravesando una plagioclasa en el camino. Si bien en este caso el paso de la fractura es en forma diagonal al maclado de la plagioclasa, esta última ya se encuentra bastante fracturada.

Se aprecia en este caso una visibilidad mucho mayor de la fractura en la imagen SEM que en la microscópica, donde es cubierta por una oxidación. Esta alteración también permite trazar un

recorrido de la fractura pero menos preciso que la imagen SEM, ya que no sólo se encuentra localizada en la fractura y se esparce por el resto del corte.

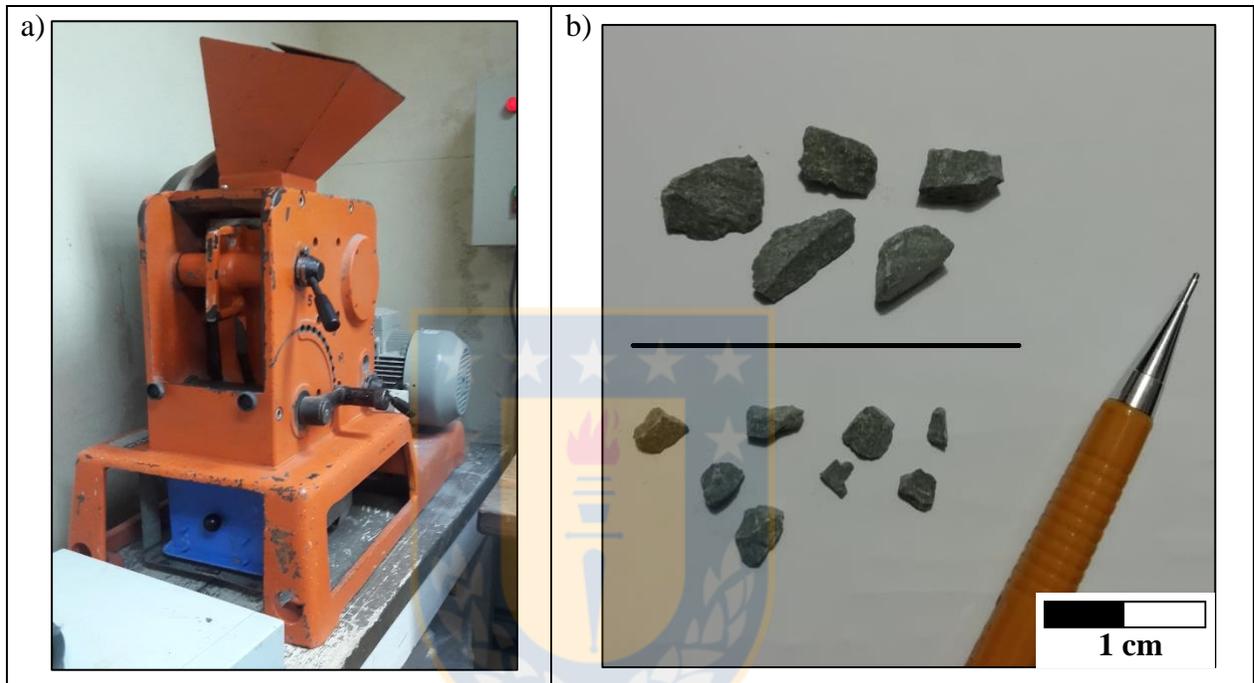


Microfotografía 3.11: (a), (b) y (c) imágenes SEM basalto vesicular, la tercera editada distinguiendo el borde mineral y fractura. (d) imagen en microscopio óptico. LPP. 200x.

4. CARACTERIZACIÓN FINAL

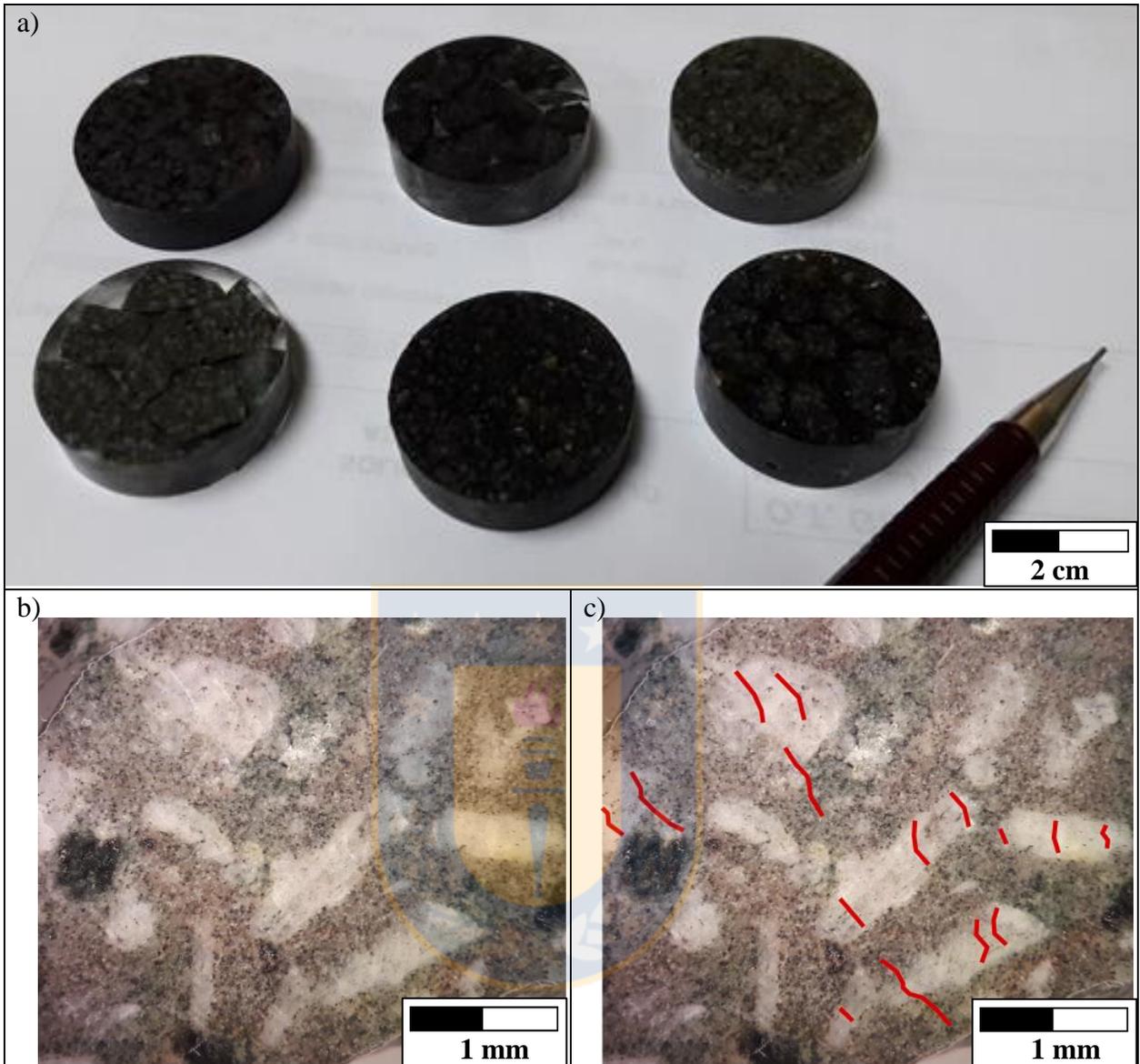
4.1. Ensayos

Una vez terminada la caracterización litológica y estructural de las rocas en su estado de origen, se efectuaron ensayos de chancado seleccionando una fracción gruesa de 6 mm y una fracción fina de 3 mm (Fotografía 4.1, b).



Fotografía 4.1: a) Chancadora de mandíbula Fritsch modelo Pulverisette 1. b) Foto de los fragmentos resultantes en el chancado. 6mm sobre la línea negra y 3 mm bajo la línea negra.

Los fragmentos resultantes fueron fijados con resina y dimensionados a briquetas para su observación (Fotografía 4.2, a). En primera instancia bajo lupa, donde se apreciaban fácilmente los fenocristales y una que otra fractura dentro de las plagioclasas (Fotografía 4.2, b y c), pero no lo esperado con respecto a una roca que acababa de pasar por un proceso chancador, de manera que se prepararon cortes transparentes pulidos de la superficie para observarlos al microscopio óptico y luego con microscopía electrónica. Esta observación de secciones evidenció más microfracturas que las notadas a simple vista tanto para los fenocristales como para la masa fundamental. El escaneo completo de las secciones con el *software* ruso SIAMS 800 es adjuntado en el anexo N° III.



Fotografía 4.2: a) Briquetas obtenidas a partir de los fragmentos del chancado. Dos para cada roca, fracción fina (3 mm) y gruesa (6 mm). b) Fracción gruesa andesita. 20x. c) Fracción gruesa andesita mostrando algunas fracturas observadas en rojo. 20x.

Como la fracción gruesa era quien entregaba mayor información estructural en comparación a la fracción fina, se preparó una segunda fila de cortes algunos milímetros más abajo (Figura 4.1, b) en cada briqueta y se describieron con la misma metodología que los superficiales para ampliar el conocimiento (Figura 4.1). Esta vez las secciones fueron sólo transparentes y no pulidas, para incluir una comparación entre ambos tipos de cortes vistos el microscopio electrónico. Esto último con la intención de aprovechar la característica del SEM de describir morfología de una superficie,

considerando que al pulir un corte se eliminan casi todas las imperfecciones exteriores y podría perderse información microestructural.

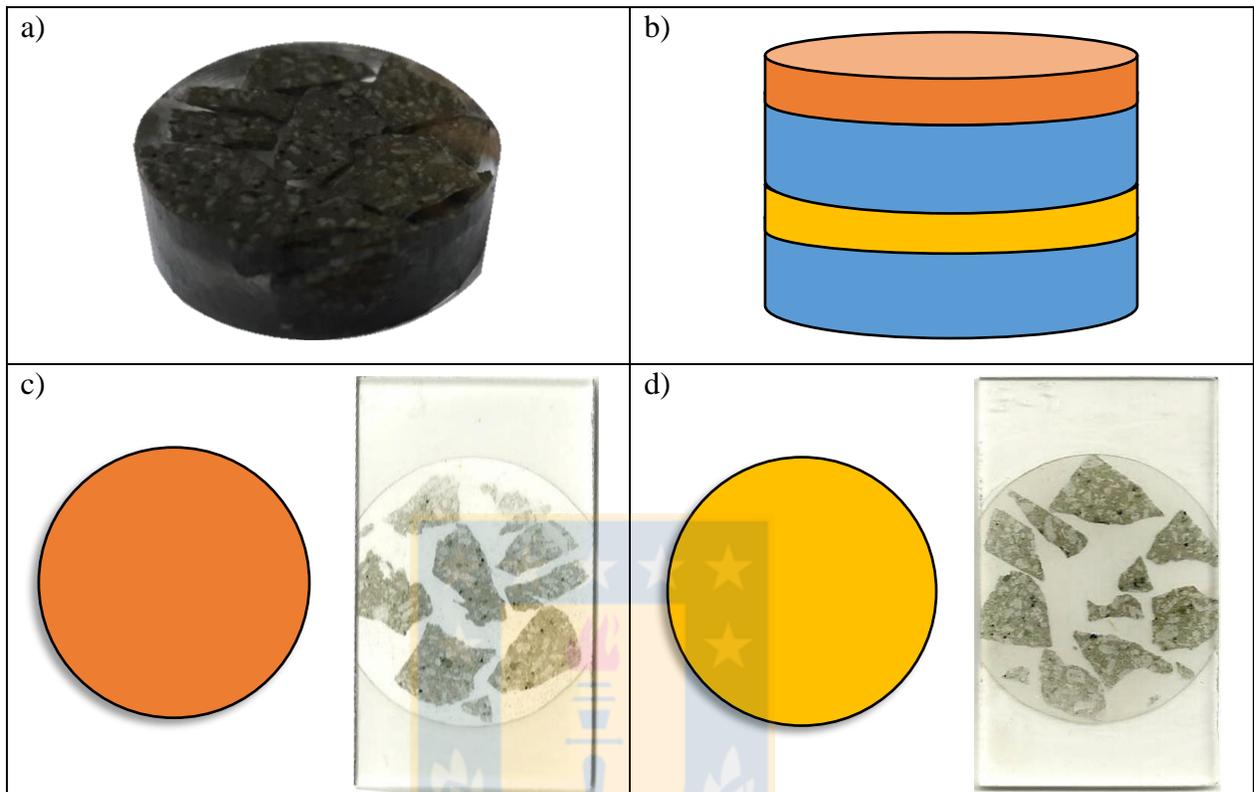


Figura 4.1: a) Briqueta fracción gruesa andesita. b) Cilindro esquematizando las posiciones de las secciones transparentes hechas en la briqueta. c) Corte transparente pulido de la superficie. d) Corte transparente sin pulir de la parte media.

4.2.Descripción Estructural

La descripción estructural de las secciones delgadas consta de tres partes. Primero un análisis del contorno de los pequeños fragmentos formados, considerando que son las zonas por donde pasaron las fracturas que dividieron el bloque de roca original. Luego una descripción de cómo los fenocristales que se encuentran en la masa fundamental pero en contacto con el borde interactúan con él, es decir, una zona de transición desde la periferia hacia el interior. Y finalmente una observación sobre el estado de fracturamiento de la parte central del fragmento considerando principalmente la masa fundamental.

4.2.1. Análisis del Contorno

El análisis de contorno consistió en medir el perímetro de las partículas en las briquetas, y determinar el porcentaje correspondiente a masa fundamental, fenocristales y vesículas. Esto para determinar el grado de influencia de estos componentes en la propagación de las fracturas.

Debido a que el campo visual de los cortes en el microscopio óptico es acotado, se tomaron varias microfotografías recorriendo el contorno para solaparlas con el *software* Inkscape 0.91, y posteriormente la imagen resultante del grano completo ingresarla al *software* ImageJ para medir su perímetro a escala (Figura 4.2).

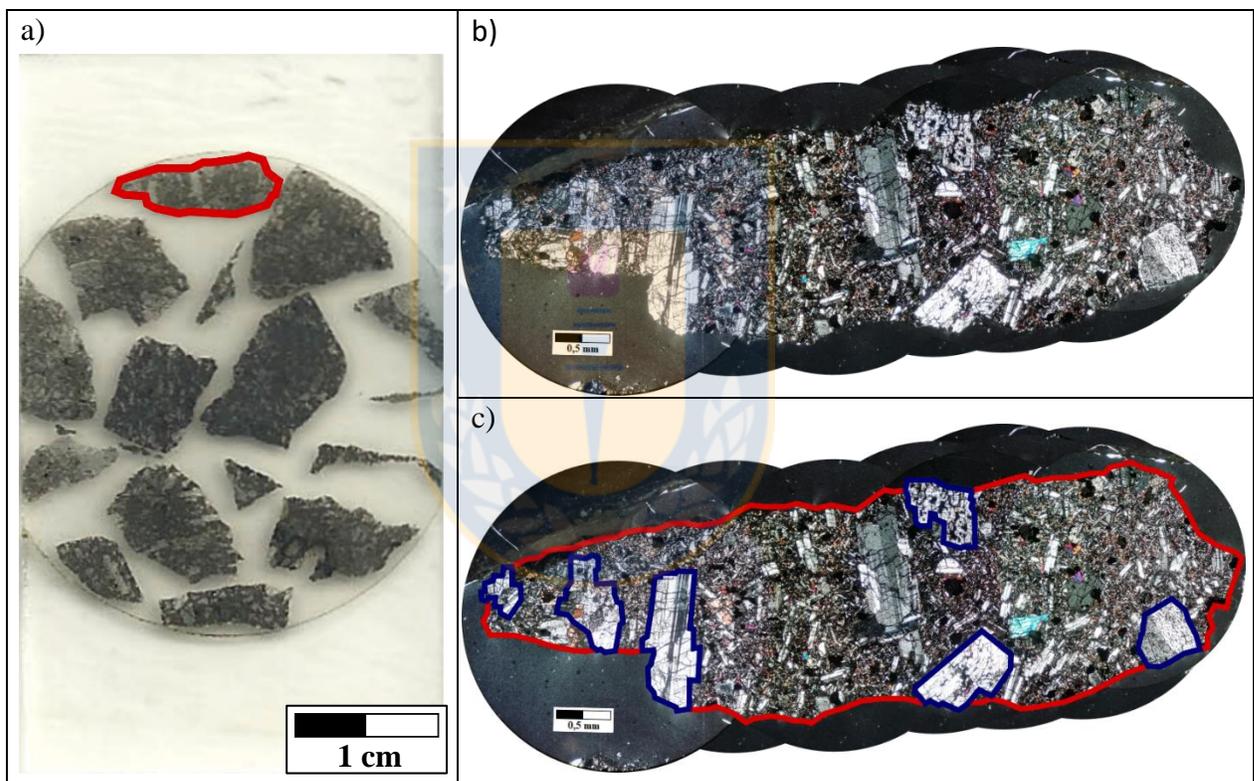


Figura 4.2: a) Corte transparente sin pulir de la briqueita de fracción gruesa del basalto (B2G). En rojo se delimita el grano mostrado con aumento en la siguiente imagen. b) Ejemplo de las microfotografías solapadas de un grano. 50x. c) Misma imagen anterior pero marcando el borde y los fenocristales que mantienen contacto con él en azul. 50x.

Para nombrar las briquetas se consideró la nomenclatura anterior de cada muestra, es decir, A1 para la andesita, B2 para el basalto y B3 para el basalto vesicular, pero esta vez agregando una “F” si corresponde a la fracción fina (3 mm), o una “G” si corresponde a la fracción gruesa (6 mm).

El resultado de la medición de perímetros en promedio es 28 mm para A1G, 24 mm para B2G y 38 mm para B3G. En general coinciden salvo por B3G (basalto vesicular), que incrementa un poco su valor debido a las vesículas que se adentran hacia el grano y aumentan la superficie. De estos perímetros, el porcentaje que corresponde a fenocristales y vesículas en cada roca es resumido en la Tabla 4.1. En ella destaca que el mayor porcentaje de los fragmentos de B3G son ocupados por las vesículas con un 61 %, y sólo un 3 % son fenocristales como parte del contorno. En los granos de A1G y B2G como no hay vesículas, la distribución es acotada a porcentajes de fenocristales y masa fundamental. Para los primeros los fenocristales son parte del 18 % del perímetro, y en los segundos ocupan el 20 %. La columna “Superficial” hace referencia al corte preparado en la superficie de la briqueta, y la columna “Medial” hace referencia al corte preparado en la parte media.

Tabla 4.1: Tabla resumen promedio y porcentual de la distribución de los componentes en el contorno de los fragmentos de la fracción gruesa para cada roca. A1G, B2G y B3G. MF: Masa Fundamental.

Fracción	Componente	Superficial (%)	Medial (%)	Total (%)
A1G	MF	84,26	80,39	82,32
	Fenocristal	15,74	19,61	17,68
	Vesículas	0,00	0,00	0,00
B2G	MF	84,26	80,39	82,32
	Fenocristal	26,74	13,52	20,13
	Vesículas	0,00	0,00	0,00
B3G	MF	35,46	35,16	35,31
	Fenocristal	4,56	1,72	3,14
	Vesículas	59,98	63,12	61,55

La misma medición se realizó para la fracción fina y así poder comparar las variaciones porcentuales a medida que se disminuye el tamaño. En este caso se ve un aumento considerable del porcentaje de fenocristales perteneciendo a las fracturas (contornos) para el basalto vesicular (B3F) y el no vesicular (B2F). En el primero el aumento es desde un 3% hasta un 28%, y en el segundo la variación positiva es del 17 %. La andesita (A1F) se mantiene sin mucha variación en comparación a las otras dos rocas subiendo de 18 a 23 %. Se distingue además una disminución considerable del porcentaje de vesículas perteneciendo al perímetro (B3F), pero haciendo hincapié

en que a menores tamaños es más complejo distinguir si el borde pertenecía a una vesícula o a la masa fundamental. Esto es resumido en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Tabla resumen promedio y porcentual de la distribución de los componentes en el contorno de los fragmentos de la fracción fina para cada roca. A1F, B2F y B3F. MF: Masa Fundamental.

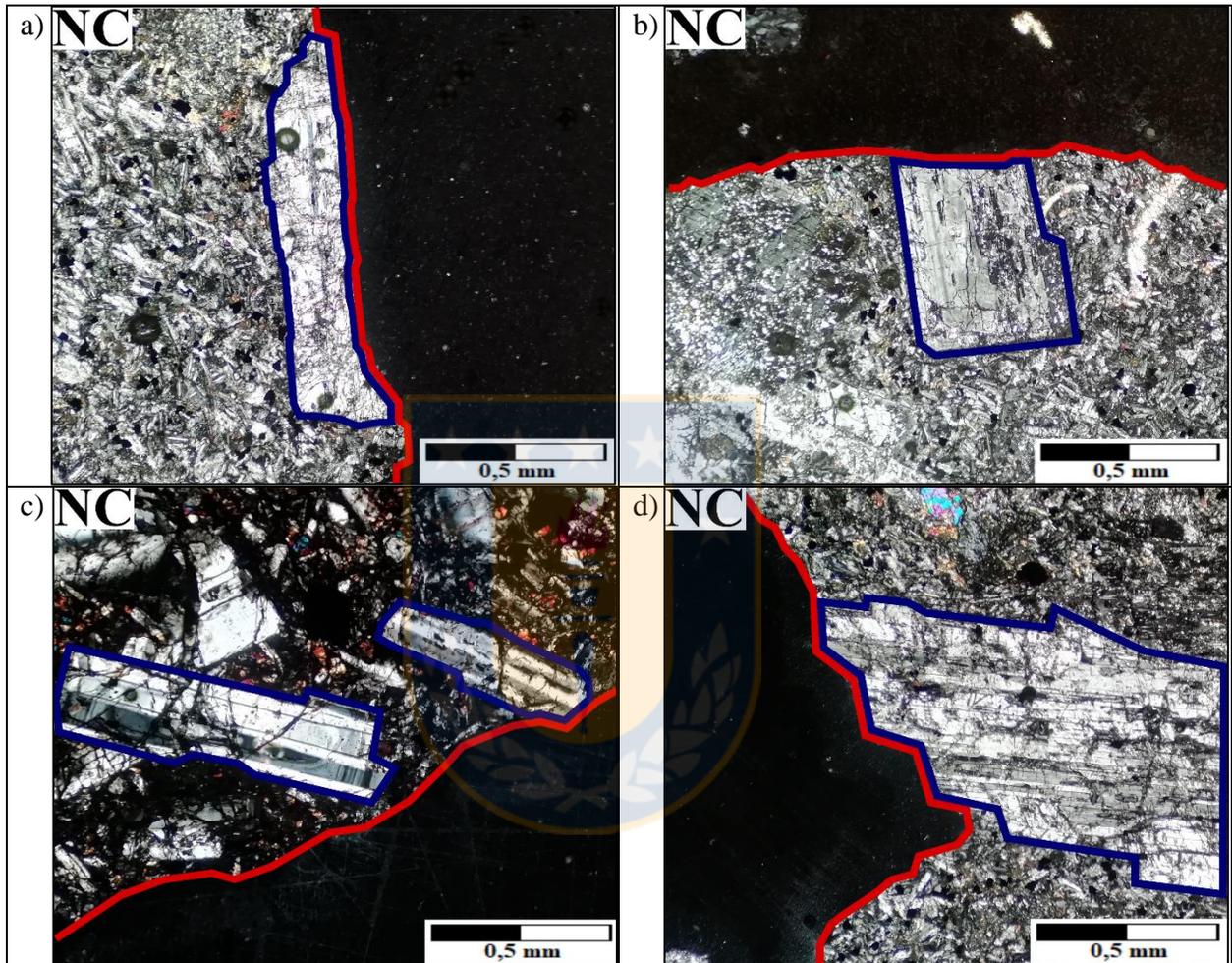
Fracción	Componente	Total (%)
A1F	MF	77,41
	Fenocristal	22,59
	Vesículas	0,00
B2F	MF	62,53
	Fenocristal	37,47
	Vesículas	0,00
B3F	MF	54,56
	Fenocristal	28,24
	Vesículas	17,19

4.2.2. Análisis Transicional

Luego del análisis de la superficie de los granos, se observó en mayor detalle la transición hacia la masa fundamental y el tipo de interacción entre los fenocristales y el borde, realizando un conteo de cada tipo de interacción distinguido para la fracción gruesa.

En general se observan 7 patrones de interacción que tienden a repetirse en las fracciones de las 3 rocas en distintas proporciones. Parte de ellos corresponden a las interacciones entre granos descritas en el capítulo anterior (arista, canal arista, punta, canal punta), pero esta vez aplicando a una interacción entre el grano y la fractura. El resto de los patrones derivan de la caracterización de las fracturas vistas en los fenocristales antes del chancado, recordando que estas se disponían principalmente se forma paralela y perpendicular al maclado. Así es como los 7 patrones advertidos corresponden a una interacción arista, canal arista, punta, canal punta, perpendicular, paralela y escalonada. Esta última dada como una ruptura en diagonal pero siguiendo un esquema de fragmentación combinado entre perpendicular y paralelo. Ejemplos de estas interacciones se muestran en la Microfotografía 4.1.

A partir de lo anterior se llevó a cabo la cuenta para cada roca considerando su corte superficial y medial, totalizando 115 interacciones para B3G, 122 para B2G y 137 para A1G. De esto se desprende un promedio de interacciones por fragmento (independiente de qué tipo sea) de 7 en B3G, 8 en B2G y 9 en A1G. El detalle del conteo por tipo de interacción se resume en la Tabla 4.3.



Microfotografía 4.1: Interacciones del fenocristal con el contorno del fragmento a través de microscopía óptica.
 a) Interacción paralela en andesita. NC. 100x. b) Interacción perpendicular en andesita. NC. 100x. c) Interacción punta a la derecha e interacción canal punta a la izquierda. Basalto (B2G). NC. 100x. d) Interacción escalonada en andesita. NC. 100x. Rojo borde fragmento. Azul borde fenocristal.

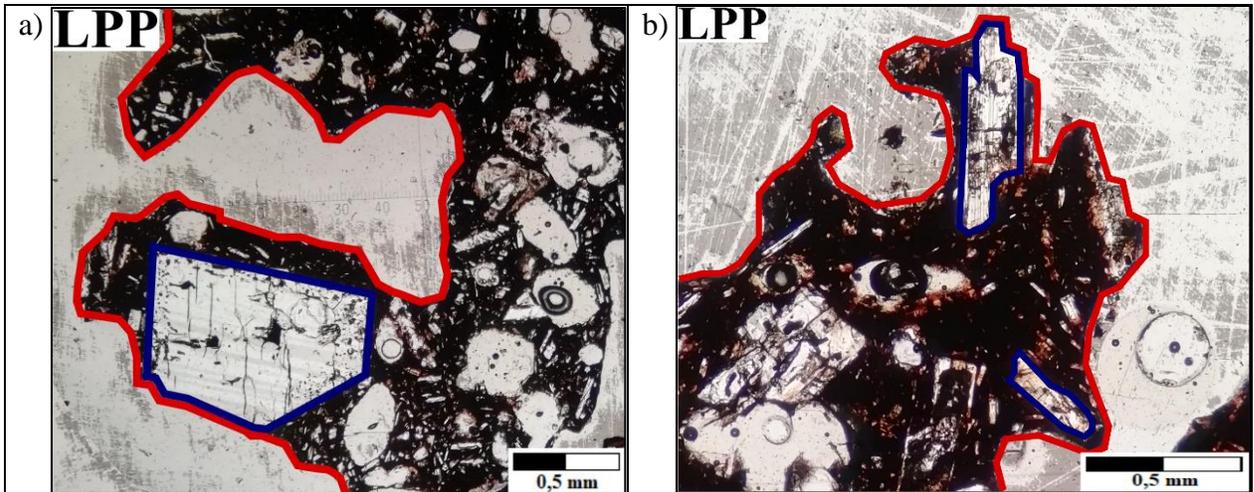
De ella se desprende que según sea el tipo de roca chancada la relación entre los fenocristales y las fracturas tiene algunos matices. Para el caso de B3G (basalto vesicular), la interacción que más se repite es la de canal arista (30), lo que se traduce en las imágenes como un camino predilecto de

las fracturas bordeando los fenocristales en vez de atravesarlos, generalmente con aquellos cuya media de tamaño es algo más baja (Microfotografía 4.2). Lo mismo aplicaría para la elevada suma de interacciones tipo punta (22) y canal arista (17). En cuanto a la ruptura en sí de los fenocristales se observa una preferencia por la fragmentación escalonada (17) en vez de la perpendicular (12) y paralela (6).

A1G (andesita) y B2G (basalto) muestran una diferencia en común con respecto a B3G, y es el mayor número de interacciones involucrando directamente al fenocristal. Ambos presentan una elevada cantidad de ruptura perpendicular a los fenocristales con 39 y 36 respectivamente, además de un elevado número para las fracturas escalonadas (29). Esto lleva a un promedio por fragmento de casi 2 interacciones escalonadas y más de 2 interacciones perpendiculares. El resto de las interacciones se encuentran todas en promedios por grano menores a 1, indicando una tendencia por los caminos de fractura a través de los fenocristales más que rodearlos.

Tabla 4.3: Tabla resumen de los tipos de interacciones por fracción, por corte y por fragmento (grano). E: Escalonado, P: Punta, CP: Canal Punta, A: Arista, CA: Canal Arista, |-: Perpendicular, //: Paralelo.

Fracción	A1G			B2G			B3G		
	Total	Corte	Grano	Total	Corte	Grano	Total	Corte	Grano
E	29	14,5	1,8	29	14,5	1,8	17	8,5	1,1
P	21	10,5	1,3	19	9,5	1,2	22	11	1,4
CP	8	4	0,5	2	1	0,1	17	8,5	1,1
A	14	7	0,9	23	11,5	1,4	11	5,5	0,7
CA	11	5,5	0,7	8	4	0,5	30	15	1,9
-	39	19,5	2,4	36	18	2,3	12	6	0,8
//	15	7,5	0,9	5	2,5	0,3	6	3	0,4
Total	137	68,5	8,6	122	61	7,6	115	57,5	7,2



Microfotografía 4.2: Imágenes de las fracturas en B3G bordeando los fenocristales en vez de atravesarlos. Rojo borde fragmento. Azul borde fenocristal. a) 50x. b) 100x.

4.2.3. Análisis Central

La última parte de la descripción estructural corresponde a la parte central de los fragmentos en las briquetas. En ella se observaron las imágenes SEM en busca de fracturas tanto en masa fundamental como en fenocristales, intentando determinar el grado de densidad en cada una y la existencia de posibles orientaciones.

En la Microfotografía 4.3 se muestran imágenes SEM para cada una de las fracciones gruesas (B3G, B2G y A1G). Se delimita el contorno de los fenocristales en rojo y se hace una distinción para las fracturas si es que se encuentran dentro del fenocristal o la masa fundamental. Las primeras son de color azul, y se observa cierta regularidad en la orientación de sus disposiciones principalmente perpendiculares entre ellas, rasgo común entre las tres rocas. Si bien este mismo patrón se presenta en los fenocristales antes de someterse al chancado, la mayor diferencia es vista a partir de la masa fundamental donde comienzan a manifestarse fracturas de diversa longitud, que no muestran alguna orientación preferencial, pero si cambios en su densidad según sea el tipo de roca, sin condicionar el hecho de que tiendan a concentrarse cerca de los fenocristales.

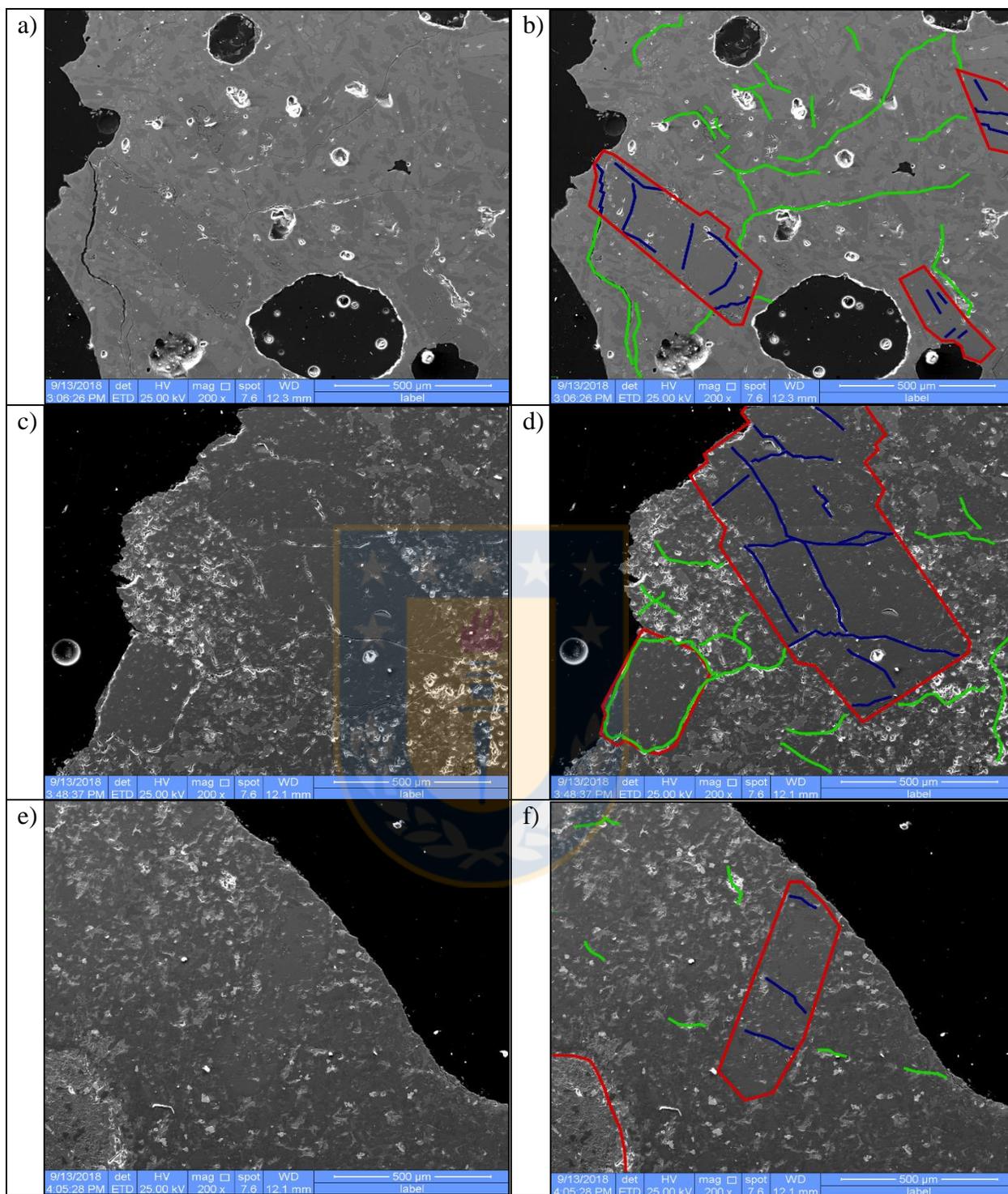
B3G es la fracción con mayor densidad de fracturas dentro de la masa fundamental, existiendo de variadas longitudes e influenciadas por la elevada presencia de vesículas. En su contraparte se encuentra la fracción A1G con la masa fundamental más intacta de las tres rocas.

Otra característica a considerar de las fracturas, es el tipo de comportamiento que tienen al enfrentarse con un fenocristal en su camino, donde si bien se ha observado pueden atravesarlo de forma escalonada, perpendicular o paralela, también pueden rodearlo y propagarse por el límite entre el fenocristal y la masa fundamental. Ejemplo de esto son las Microfotografías 4.3 (d) y 4.4.

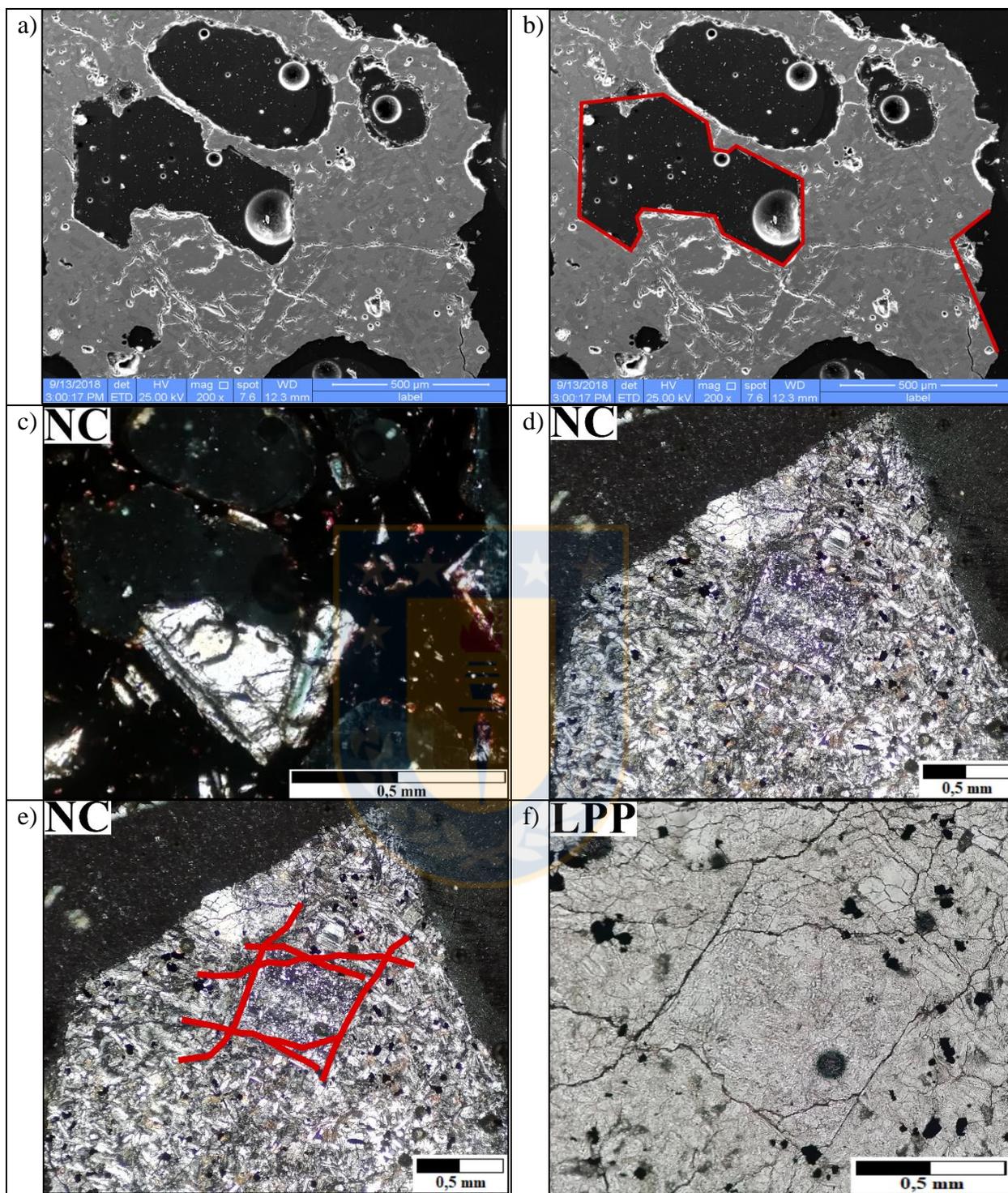
En la Microfotografía 4.4 (a) y (b) de la fracción B3G, se observan huecos con forma de fenocristales por la propagación de fracturas bordeando el mineral. En la imagen (c) se distinguen además algunos restos minerales que no alcanzaron a ser desalojados.

Las imágenes (d), (e) y (f) muestran una plagioclasa no desalojada de la fracción A1G, pero si con fracturas notorias a lo largo de todo su perímetro e incluso extendiéndose un poco más. Este patrón de ruptura perimetral es confirmado además en la fracción fina donde aparecen numerosos cristales individuales entre los fragmentos del chancado (Microfotografía 4.5).

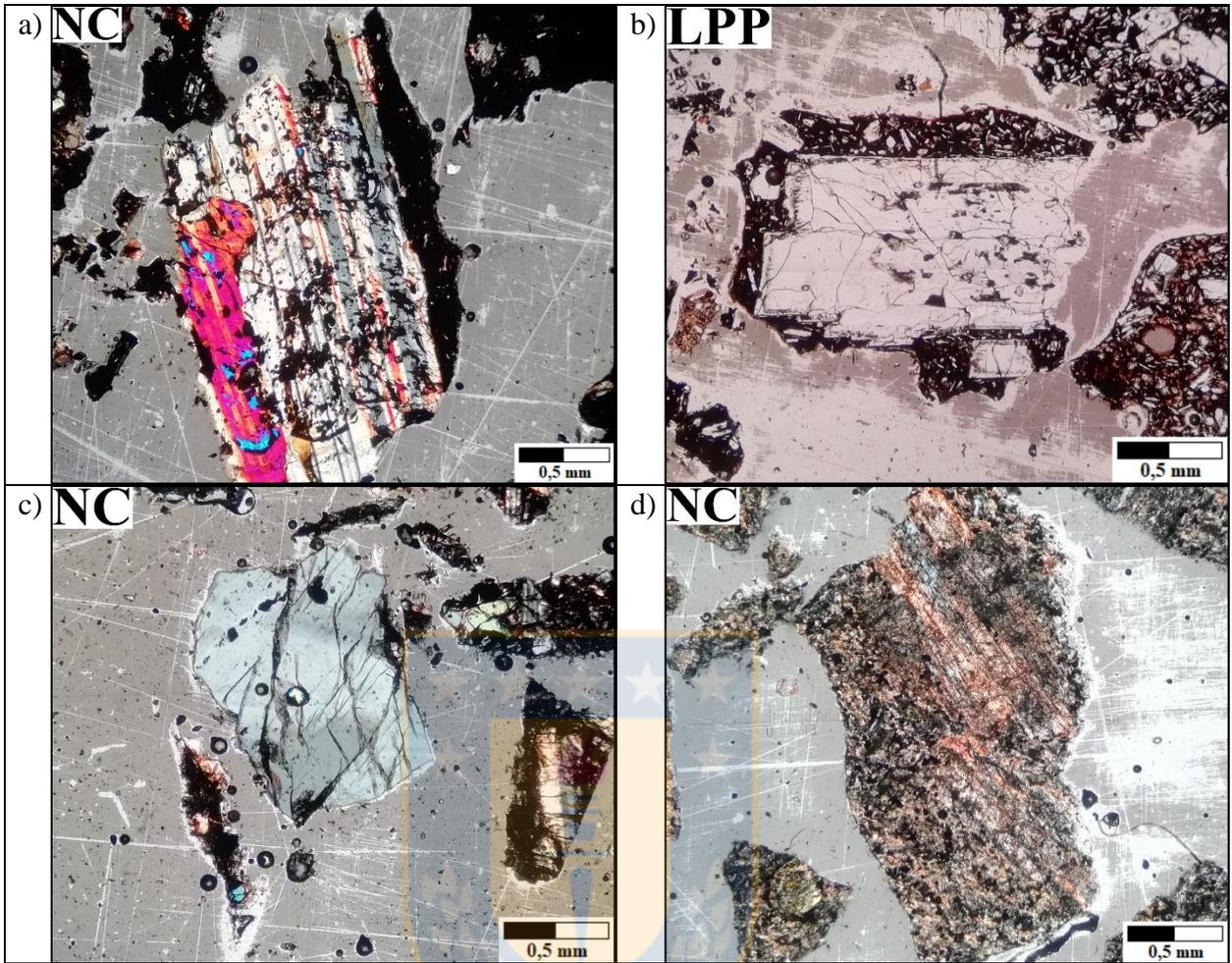




Microfotografía 4.3: (a) y (b) imágenes SEM B3G. 200x. (c) y (d) imágenes SEM B2G. 200x. (e) y (f) imágenes SEM A1G. Rojo borde fenocristales. Azul fracturas en fenocristales. Verde fracturas en masa fundamental.

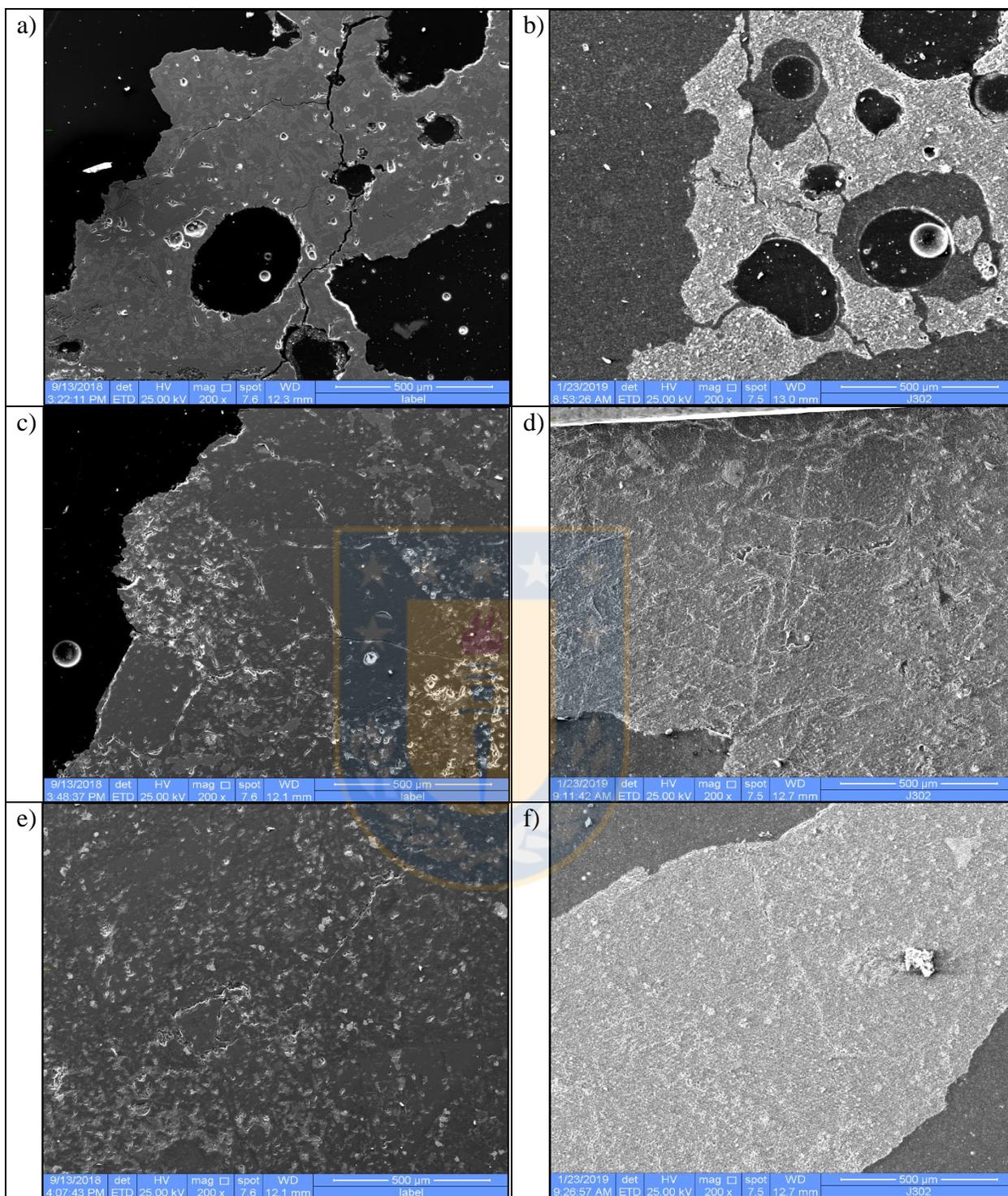


Microfotografía 4.4: (a) y (b) imágenes SEM B3G. 200x. (c) imagen microscópica óptica B3G. 200x. (d) y (e) imágenes microscópicas ópticas A1G. 50x. (f) imagen microscópica óptica A1G. 100x. Rojo fracturas.

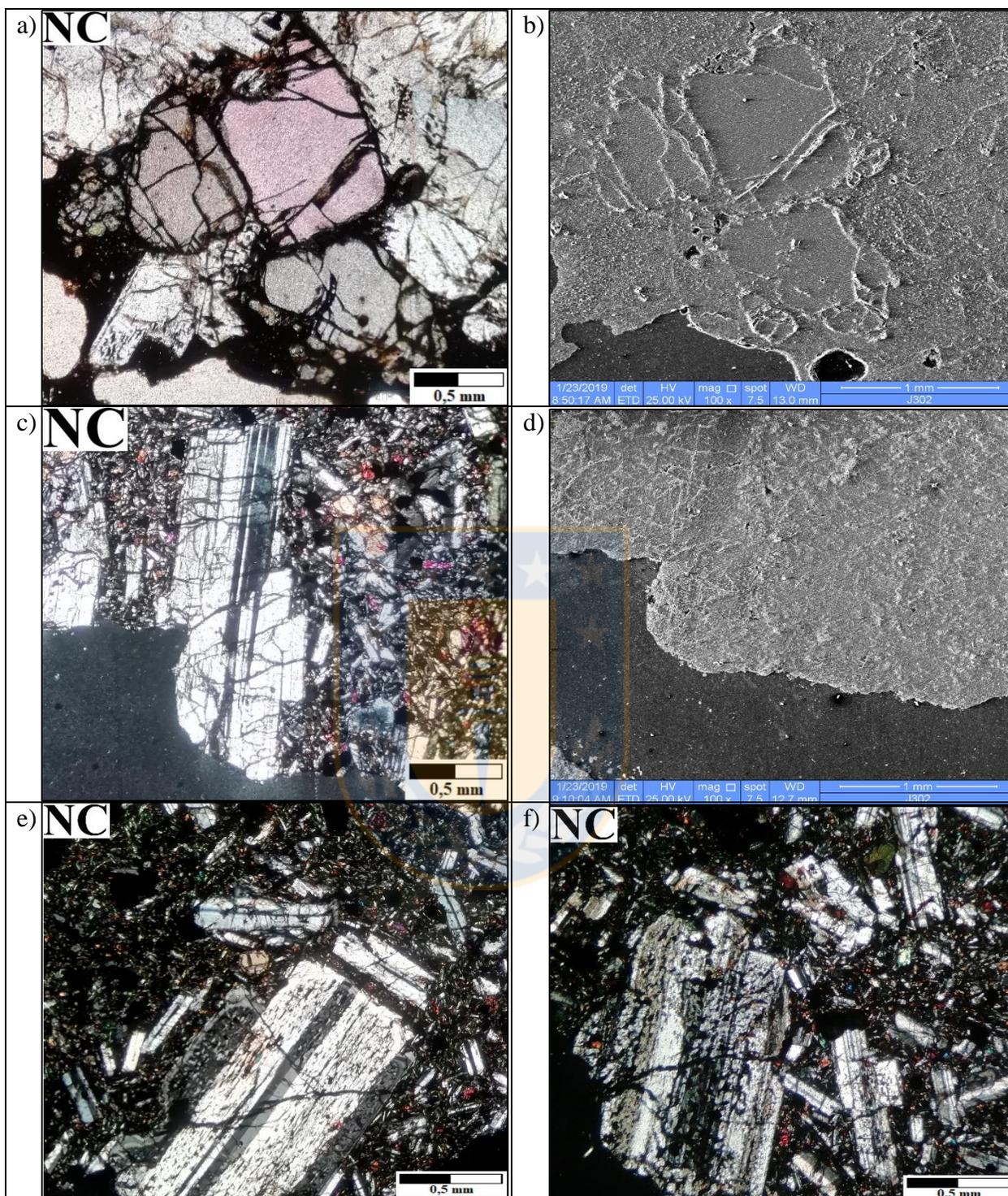


Microfotografía 4.5: Imágenes microscópicas ópticas de fenocristales individuales en la fracción fina. (a) y (b) B3F. 50x. (c) B2F. 50x. (d) A1F. 50x.

Finalmente se hizo una comparación visual del tipo de información que entregaban las imágenes SEM de las briquetas sin pulirse con respecto a las que estaban pulidas (Microfotografía 4.6). Se aprecia en primera instancia que aquellas sin pulir muestran un relieve superficial mucho más pronunciado, pero sin destacar de sobremanera las fracturas a menos que éstas tengan un espaciamiento importante. Si es así se distinguen con un color negro, pero si no, como es el caso de las fracturas más pequeñas o superficiales, presentan un color más claro en comparación al resto de la masa fundamental. Otra diferencia yace en la visibilidad del borde de los fenocristales que permite discernir si las fracturas pertenecen a un fenocristal o a la masa fundamental. En las imágenes de las briquetas pulidas se logra visualizar una silueta del contorno de los minerales, mientras que en las imágenes de las briquetas no pulidas es difícil distinguir algo, a menos que se comparen con una imagen en microscopio óptico de la misma posición, Microfotografía 4.7 (a), (b), (c) y (d).



Microfotografía 4.6: (a), (c) y (e) imágenes SEM de las briquetas pulidas. Corte superficial. 200x. (b), (d) y (f) imágenes SEM de las briquetas sin pulirse. Corte medial. 200x. (a) y (b) B3G. (c) y (d) B2G. (e) y (f) A1G.



Microfotografía 4.7: (a) imagen microscopio óptico de un olivino fracturado B3G. 100x. (b) imagen SEM B3G sin pulir, misma posición que (a). 100x. (c) imagen microscopio óptico de una plagioclasa fracturada B2G. 100x. (d) imagen SEM B2G sin pulir, misma posición que (c). 100x. (e) imagen microscopio óptico de corte B2G pulido. 100x. (f) imagen microscopio óptico de corte B2G sin pulir. 100x.

En esta última microfotografía se muestra que las imágenes SEM tienen un marcado relieve de coloración clara para las fracturas de los minerales, pero se necesita para la interpretación el apoyo de una segunda imagen que permita dilucidar el contorno de los fenocristales.

Para terminar se comparan dos imágenes microscópicas de la fracción B2G en la Microfotografía 4.7 (e) y (f). La primera corresponde al corte pulido, y la segunda al corte sin pulir. En cuanto a estructuras no se aprecian mayores diferencias, en ambas se distinguen con coloración negra sólo aquellas presentes en los fenocristales, y en ambas se pierden aquellas que puedan propagarse por la masa fundamental. La única leve diferencia apreciable a simple vista es la aparente suciedad presente en el corte no pulido. Cabe destacar que los cortes vistos en luz reflejada logran evidenciar las fracturas presentes en la masa fundamental, cualidad posible sólo en los cortes transparentes pulidos.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.Descripción Estructural

5.1.1. Andesita (A1)

Luego de describir la roca microestructuralmente antes y después de un chancado de laboratorio, es posible intentar generalizar condiciones de ruptura comparando los dos estados en cada roca. Para el caso de la andesita, las fracturas estaban mayoritariamente concentradas en los fenocristales tanto de plagioclasa como de piroxeno, pero como estos últimos se encontraban en notoria minoría con respecto a las primeras, es que se desestima su influencia en la propagación de fracturas para este caso. Las plagioclasas se encontraban en promedio altamente fracturadas y además muchas estaban cubiertas por alteración fílica. En aquellas que era posible distinguir la orientación de las fracturas coincidían todas en presentar dos tipos de direcciones, perpendiculares al maclado las más cortas y paralelas al maclado las más largas. Esto seguramente debido a su sistema cristalográfico diseñado en bloques de cadenas de elementos y su preferencia por un clivaje perfecto en dos direcciones cercanas a 90° . El resto de la masa fundamental se hallaba más limpia de alteración y más intacta estructuralmente, salvo por algunas fracturas centimétricas (20 mm) con relleno de clorita que posteriormente no pudieron ser localizadas en el borde de alguno de los fragmentos observados en briqueta.

Una vez generados los fragmentos de andesita y descritos por un análisis de contorno (Capítulo 4.2.1.), lo primero a destacar es que en promedio la superficie está compuesta por 82% de masa fundamental y 18% de fenocristales (Tabla 4.1), lo que indica que para una roca de andesita con 42% de fenocristales (Tabla 3.1) y considerados a partir de una media de tamaño de 0,5 mm, las fracturas no tienden a producirse en su mayoría atravesando los fenocristales, tomando en cuenta además que se encontraban previamente bastante fracturadas. En vez de eso, las fracturas tienden a propagarse por la masa fundamental, y una vez que se encuentran con un mineral, pueden rodearlo o atravesarlo si es que coinciden con alguna de sus roturas previas. Como se mencionó para el caso de las plagioclasas, éstas presentaban fracturas perpendiculares entre ellas, de manera que si se rompían, lo harían siguiendo esta misma condicionante, así es como se pueden ver posteriormente en las briquetas fracturas en las plagioclasas con cortes casi perfectos paralelos o perpendiculares al maclado, y otros de forma escalonada si es que la fractura se venía propagando de forma diagonal.

La propagación de la ruptura rodeando las plagioclasas es algo que se puede ver de forma acentuada en la fracción más fina de las briquetas, ya que muchos de los fragmentos resultantes están constituidos casi exclusivamente por este mineral. Otros fragmentos no tienen el borde en contacto con el fenocristal, pero sí lo rodean a una pequeña distancia formando una especie de canal de masa fundamental, lo que coincide con los tipos de interacción propuestos entre fenocristales y con el contorno del fragmento como “canal punta” y “canal arista”, mencionados en la descripción estadística del Capítulo 3.3.2.

En general la masa fundamental con la disminución de tamaño continúa casi limpia de fracturas, estando éstas concentradas en los fenocristales o en los bordes de ellos, siendo más abundante en los primeros, y sin considerar las más grandes vistas en un principio, debido a su evidente separación en el proceso.

5.1.2. Basalto (B2)

Por otro lado el basalto se presenta en un principio con una condición estructural más intacta que la andesita, casi sin fracturas en la masa fundamental, pero si bastantes en los fenocristales sobre todo en las plagioclasas y en los olivinos. Las primeras mostraban el mismo patrón de ruptura perpendicular (clivaje) que el visto en las andesitas, pero esta vez con un rango de fracturación más amplio abarcando desde algunas muy fisuradas hasta otras casi intactas. Los olivinos evidenciaban un estado común de alta rotura y sin aparente orden de orientación, además de poseer fracturas más anchas y profundas que el resto de los fenocristales. En ambos casos se observaban indicios de fracturamiento por el contorno del mineral.

Al chancar la roca es posible distinguir en los fragmentos un aumento en el porcentaje de la superficie que pertenece a fenocristales y no a la masa fundamental, específicamente de un 20% a un 37 % (Tablas 4.1 y 4.2). Si bien la tendencia sigue siendo romper la masa fundamental por sobre los fenocristales, éstos adquieren ahora más protagonismo y posiblemente por las diferencias cualitativas (estado estructural, forma, alteración) que presentan entre cada roca. El factor cantidad se descarta porque el porcentaje total de fenocristales es muy similar (42% en la andesita y 44% en el basalto, Tabla 3.1), y además en ambos casos la mayoría corresponde a plagioclasas. La principal disimilitud yace en el estado estructural de las plagioclasas, mientras en la andesita el porcentaje de elementos altamente fracturados era de un 78% y 16% para los medianamente fracturados, en el basalto cae el primero hasta un 49%, y los medianamente fracturados suben a un 39% (Tabla

3.5). Otra diferencia es el elevado número de granos euhedrales en el basalto contra la predominancia de los granos subhedrales en la andesita, seguramente influenciado por la ausencia de alteración en el primero. La última semejanza es la presencia de vidrio en aproximadamente la mitad de los fenocristales de plagioclasa (Tabla 3.5).

Este factor cualitativo de las plagioclasas hace que la propagación de las fracturas tienda a comportarse de manera distinta en cada caso. El hecho de que se encuentren usualmente más fracturadas en la andesita favorece una propagación de fracturas a través de ellas más que rodearlas, mientras que en el basalto al estar más intactas, de alguna forma obstaculizan el paso desviando las fracturas por las aristas del grano, y ésta es precisamente una de las diferencias más destacadas en las interacciones que los fenocristales mantienen con el borde de los fragmentos para cada roca, 1,4 interacciones del tipo “arista” por grano para el basalto y 0,9 para la andesita (interacciones tipo arista) (Tabla 4.3).

Otra diferencia advertida es sobre la consistencia de los bordes de los fragmentos, donde se ve al basalto más disgregado en comparación a los fragmentos de la andesita que se ven más compactos. Esto a vista macroscópica se traduce en una distinción de redondeamiento entre ambos casos, mostrándose los fragmentos del basalto como redondeados y sub-redondeados, y los de la andesita como angulares y sub-angulares.

La fracción fina en general tiene un aspecto similar a la andesita, con las fracturas tendiendo a concentrarse en los fenocristales y muchos de ellos aislados por la ruptura en sus orillas.

5.1.3. Basalto Vesicular (B3)

Concluyendo con el basalto vesicular, éste cuenta con el distintivo del importante porcentaje de vesículas en su estructura, alcanzando el 58 % de éstas y restringiendo los fenocristales a un 20 % (Tabla 3.1). En su aspecto original dista de las dos primeras rocas por el hecho de presentar fracturas tanto en los fenocristales como en la masa fundamental, siendo que las otras tendían a concentrarlas sobre todo en los fenocristales. En este caso la elevada presencia de vesículas influye de sobre manera en la aparición de fracturas y sus bajas longitudes en la masa fundamental, ya que todas éstas comienzan y terminan en una vesícula. Lo que va variando luego es el recorrido que toman estas fracturas al propagarse por la masa fundamental e interactuar con los minerales. Las plagioclasas son los fenocristales en mayor abundancia seguidas por el olivino, y si bien todos

muestran un grado de fracturación más homogéneo, éste tiene cierta inclinación hacia el grado entre medio y alto.

Los fragmentos resultantes del chancado para esta roca son similares en geometría a los del basalto no vesicular, es decir, bastante más redondeados que los fragmentos angulados de la andesita. Su superficie es ocupada previsiblemente en su mayoría por bordes de vesículas, y sólo un 3% corresponde a fenocristales (Tabla 4.1). Este porcentaje aumenta considerablemente a un 28% (Tabla 4.2) una vez que se tritura hasta la fracción fina, indicando la posterior y significativa influencia de los fenocristales en la propagación de fracturas una vez que el tamaño es menor y las vesículas van desapareciendo. Si bien la implicancia de la masa fundamental también aumenta, es mayor la diferencia positiva en el porcentaje de fenocristales (diferencias de 20 y 25 % respectivamente, Tablas 4.1 y 4.2).

La propagación de fracturas aparentemente se inclina hacia rodear los minerales más que atravesarlos, y los bordea dejando un espacio entre la fractura y el mineral como algunos casos en la andesita. De este modo las interacciones entre fenocristal y borde de fractura son principalmente del tipo “canal arista” y “punta” (Tabla 4.3). A considerar es el hecho de que al ser bajo el porcentaje de fenocristales en la roca, éstos casi no tienen interacción entre ellos como las otras dos, manteniéndose habitualmente más aislados y quizás así influyendo en que la propagación sea preferentemente si tocar los minerales.

5.1.4. Resumen

Según Tandon y Gupta (2013), la resistencia de las rocas depende de la cantidad y orientación de los minerales débiles como las micas, éstos actúan como vacíos donde las fracturas inician y se propagan fácilmente bajo esfuerzos. En el caso de las muestras de este trabajo no hay minerales débiles que puedan actuar de esta manera, salvo por las moscovitas presentes como parte de alteración y que se distribuyen sin orden por la roca. Si bien generalmente se encuentran asociadas a plagioclasas fracturadas, es difícil determinar si una de las dos características es más influyente que la otra al momento de propagar fracturas. Posiblemente actúen de forma conjunta.

La alteración es un rasgo presente sólo en la andesita, mientras que el fracturamiento previo en las plagioclasas es un rasgo que se repite también en los basaltos, aunque en distinta abundancia. Éste puede considerarse uno de los puntos débiles en las rocas, y como punto de partida para el

fracturamiento, pero para Ündul y otros (2015) esto no es suficiente, sólo influyen en la propagación. Considerando esto, y estudios de autores como Cabri y otros (2008) o Shi y otros (2014), que mencionan la línea de contacto entre los fenocristales y la masa fundamental como otra zona de debilidad, es posible valorar ambos conceptos (fractura previa en los fenocristales y línea de contacto entre fenocristales y masa fundamental) y confirmarlos como la base de propagación de fracturas en este trabajo.

La propagación se da principalmente de dos formas, rodeando los fenocristales cuando estos se encuentran con bajo o nulo fracturamiento, y atravesándolos cuando estos presentan debilidades previas como el clivaje. En zonas donde la cantidad de fenocristales es escasa, la ruptura tiende a producirse de forma paralela o subparalela a la dirección de máxima carga (Griffith, 1921), pero a medida que aumenta la presencia de fenocristales, la fractura se desvía hasta entrar en contacto con algún fenocristal, tomando direcciones más oblicuas o perpendiculares a la dirección de máxima carga.

Cuando las plagioclasas se encuentran casi intactas, sin fracturas ni alteración, éstas desvían las fracturas hacia sus bordes actuando como barreras, tal como lo hacen los cuarzos en el trabajo de Tandon y Gupta (2013).

5.2. Métodos de Caracterización

Diferentes métodos se utilizaron para intentar caracterizar de la forma más completa posible el estado estructural de las rocas antes y después de un chancado de laboratorio. Partiendo por las básicas observaciones macroscópicas, hasta el análisis de imágenes microscópicas electrónicas.

El primer método aplicado en este trabajo y considerado estadístico es el que permitió definir tipos de interacción entre fenocristales y con los bordes de fractura, caracterizando la propagación de las fisuras y determinando su comportamiento frente a los fenocristales mayoritarios de la roca. Al centrarse sobre todo en los fenocristales podría acotarse su utilidad a rocas con textura porfídica, principalmente presentes en las rocas volcánicas, pero sin descartar su uso en otras texturas hasta que se pruebe. Considerando que para su funcionamiento sólo es necesario un microscopio óptico, es un método de descripción estadístico de fácil accesibilidad y bajo costo para emplearse en la industria, ya que como se mencionó en el Capítulo 2, la búsqueda de formas de optimizar el uso de

la maquinaria y reducir los costos energéticos ha sido una tarea permanente dentro de la minería (Shi y otros, 2014).

Autores como Jeswiet y Szekeres (2016) o Awuah-Offei (2018), señalan consumos de energía bastante contrastantes entre los equipos del proceso de chancado, de forma que una elección adecuada del material entrante resulta imprescindible para evitar excedentes de energía desperdiciada (Gómez y Barahona, 2003). Este método estadístico de descripción ofrece una alternativa adicional para decidir que vía de procedimiento sería la más óptima.

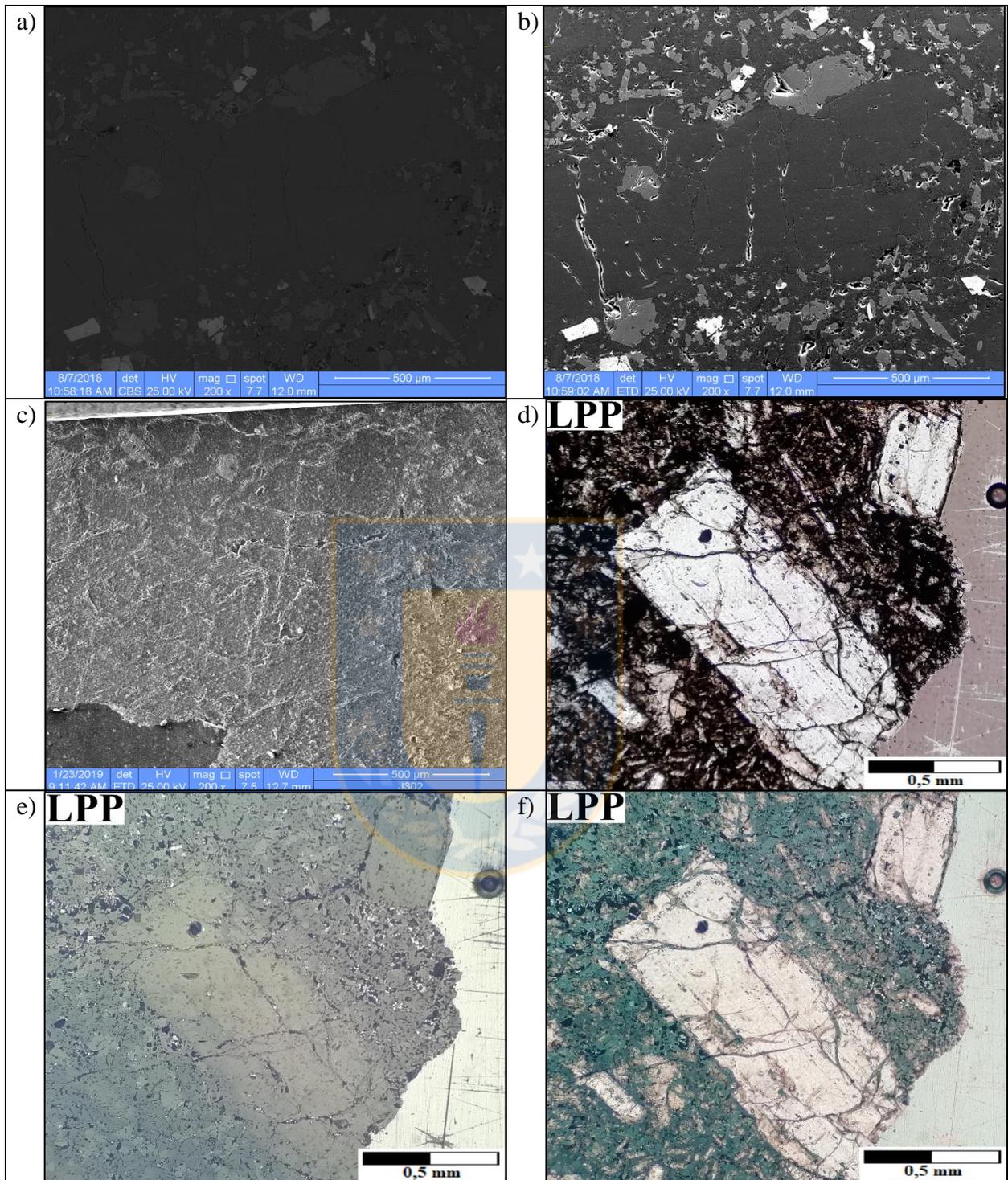
Un segundo método es el análisis cuantitativo microestructural (QMA), que busca cuantificar las propiedades geométricas de los microconstituyentes de una roca. Para su uso es necesario preparar tres cortes ortogonales entre sí, luego por medio de *software* matemático cuantificar sus propiedades y graficarlas en estereogramas. Entregando así una idea de la distribución espacial de los elementos de la roca y su cuantificación (Popov y otros, 2014a). De acuerdo a esto parece ser más eficiente cuando exista alguna orientación dentro de los componentes que cuando haya más heterogeneidad. Si bien la forma es útil para separar las cualidades de una roca que podrían influir en la fracturación de ésta, no considera la existencia de microfracturas que en la práctica son los verdaderos puntos de debilidad de una roca. Es viable utilizar posteriormente ensayos de esfuerzo para intentar individualizar la influencia de cada elemento en la trituración de una roca, pero es necesario complementar con información sobre estructuras presentes antes y después del ejercicio.

Otro método utilizado fue la observación con SEM y QEMSCAN® de los cortes antes del chancado y de las briquetas luego del chancado. Comúnmente la observación microscópica es restringida al microscopio óptico para las descripciones, pero no siempre resulta de total utilidad para observar microfracturas en la roca, principalmente porque a veces hay alteraciones que dificultan la visibilidad al estar sobrepuestas, tal es el caso de la andesita. Otro factor influyente en las observaciones es el tipo de masa fundamental que presenta la roca, sobre todo en rocas volcánicas donde existe mucho vidrio y que en cortes microscópicos dificulta la visualización de fracturas, en este caso como los basaltos. Tomando esto en consideración es que se utilizó la microscopía electrónica para profundizar las descripciones.

Para utilizar el sistema QEMSCAN® es necesario que las secciones transparentes estén pulidas, no así para el SEM. De forma que se prepararon cortes transparentes tanto pulidos como no pulidos, y ambos fueron vistos bajo los dos métodos. Lo primero a mencionar es que las imágenes del

software QEMSCAN® se enfocan en la composición y las imágenes SEM lo hacen en la morfología. En ambas es posible distinguir fracturas pero en aspectos generales las primeras se ven más oscuras que las segundas (Microfotografía 5.1, a y b), recordando que el QEMSCAN® tiene una etapa final aún de asignación de falsos colores que para el fin microestructural no es de completa utilidad (Gottlieb y otros, 2000). Esto último debido a la forma en que se asignan los colores por pixel considerando la composición mayoritaria cada cuadro. Generalmente esto causa cierta difusión en los bordes a escalas más pequeñas, y son precisamente los bordes de las fracturas lo más importante para poder observarlas. Otro punto de comparación es el espaciamiento de las fracturas, mientras más amplio sea este, más notorias serán en SEM.

En el caso de las imágenes SEM estando los cortes pulidos es posible apreciar de buena manera las fracturas por el mayor rango de colores grises que se utilizan según la profundidad. También son más notorias a medida que aumenta la separación entre ellas, y además se distingue bien el contorno de los fenocristales, principal diferencia con un corte no pulido. En teoría el SEM funciona caracterizando la morfología de una superficie, y así mientras más irregular se encuentre ésta, más explicativa debería ser la imagen. En función de esto fue la preparación de cortes pulidos y no pulidos, con la idea de obtener mayor información sobre las fracturas en superficie. Una vez observadas las imágenes SEM de los cortes no pulidos, se confirmó que morfológicamente mejoraba la definición de la superficie, pero sin marcar grandes diferencias informativas con una sección que no esté pulida, ya que no solo resalta las fracturas sino que también resalta cualquier otra imperfección existente en el resto de la superficie. Otro detalle importante es que no hace una distinción del borde de los fenocristales, por lo que es difícil determinar si las fracturas corresponden a un fenocristal o a la masa fundamental (Microfotografía 5.1, c). Salvo cuando éstas vienen asociadas con una alteración y se propagan tanto por el centro como por los bordes del fenocristal. Ejemplo de esto son los olivinos en ambos basaltos.



Microfotografía 5.1: Comparación de imágenes para el basalto no vesicular (B2G). (a) imagen BSE 200x. (b) imagen SE de corte pulido 200x. (c) imagen SE de corte no pulido 200x. (d) imagen por microscopía óptica en LPP luz transmitida. 100x. (e) imagen por microscopía óptica en LPP luz reflejada. 100x. (f) imagen por microscopía óptica en LPP luz reflejada y transmitida. 100x.

El último método de observación es un reajuste al funcionamiento del microscopio óptico. Éste instrumento funciona con dos tipos distintos de luces para observar secciones delgadas, una luz reflejada que se usa para ver minerales metálicos por medio de cortes pulidos, y una luz transmitida que se usa para ver los minerales no metálicos a través de cortes transparentes. Si una sección es preparada bajo ambas condiciones (pulida y transparente), es posible observar tanto minerales metálicos como no metálicos según sea el mecanismo de luz que se utilice. En este trabajo los cortes se prepararon transparentes y pulidos, de modo que se podían utilizar ambos sistemas de luces.

El reajuste del funcionamiento del microscopio consistió en emplear los dos mecanismos de luces a la vez. Si el corte es visto en luz reflejada se pueden distinguir de gran manera las fracturas pero sin diferenciar a qué mineral no metálico corresponden. Si además se emplea la luz transmitida puede verse la silueta de los minerales y diferenciar si las fracturas son parte de ellos o de la masa fundamental (Microfotografía 5.1, e y f).



6. CONCLUSIONES

La caracterización de fracturas formadas por un chancado en tres rocas, una andesita y dos basaltos, permite determinar la existencia de parámetros mineralógicos que condicionan su propagación. Debido a que las tres rocas presentan textura porfídica, es factible generalizar las conclusiones a este tipo de distribución, pero sugiriendo realizar las mismas caracterizaciones en rocas con otro tipo de textura.

Los parámetros mineralógicos determinados se centran en el estado estructural de los fenocristales antes de someterse al esfuerzo, e influyen directamente en la forma en que una fractura se propaga a lo largo de la roca. Para este caso en particular, la abundancia mineralógica viene dada por las plagioclasas, de manera que se restringe el término “fenocristal” sólo a ellas. Sería de utilidad realizar estudios similares en rocas de mayor variabilidad composicional.

La fractura ante un esfuerzo en la roca se produce inicialmente de forma paralela o subparalela a la dirección del esfuerzo (Griffith, 1921), y se propaga en esa dirección por la masa fundamental hasta encontrar plagioclasas en su camino. En este punto el mineral se encuentra con distintos grados de fracturamiento, si es alto, la fractura se propaga a través de él, y si es bajo, la fractura lo rodea, considerando además, que mientras más euhedral sea la forma, más perfecta es la propagación por la línea de interface entre el mineral y la masa fundamental.

En el caso del basalto vesicular, son las vesículas las que guían en primera instancia la fracturación, conectándose por medio de fracturas que se propagan en su mayoría por la masa fundamental y evitando los fenocristales. Una vez que las vesículas ya no están, las fracturas vuelven a propagarse considerando las plagioclasas como puntos de desviación.

La presencia de vidrio en los basaltos influye posiblemente en la forma final de los fragmentos, consiguiendo que se disgreguen y se observen más redondeados en comparación a los fragmentos de la andesita, que no tienen vidrio y se ven más angulares.

El método estadístico de descripción desarrollado resulta útil para caracterizar parámetros mineralógicos que influyen en la propagación de fracturas. Es de fácil accesibilidad y bajo costo. Hay que considerar que las láminas delgadas, es mejor que sean preparadas transparentes y pulidas para su uso, de forma que se puedan emplear los dos mecanismos de iluminación que permite el

microscopio óptico, luz transmitida y luz reflejada. Este uso combinado de luces resulta ventajoso para observar fracturas en masa fundamental y fenocristales.

Si la vista microscópica se dificulta por la presencia de alteraciones se puede utilizar el SEM. Éste trabaja a una escala más pequeña (micrométrica), pero distingue de buena manera las microfracturas a pesar de las alteraciones. Según el objetivo de su uso se puede emplear con cortes pulidos o no pulidos. Un corte no pulido mejora la definición de las estructuras pero dificulta la distinción del borde de los fenocristales, de modo que para texturas porfídicas se recomienda un corte pulido.

El QEMSCAN® sirve para describir las formas de los fragmentos por medio de un barrido retrodisperso en un corte de briqueta y analizar los fenocristales presentes en los bordes, pero para observar las fracturas a escala micrométrica hay mejores opciones como el SEM.

El método QMA es útil para describir la geometría y distribución de los componentes en una roca e individualizar sus propiedades, pero es insuficiente cuando se quieren describir las estructuras microscópicas presentes. Es necesario complementar la descripción de secciones con un conteo de estructuras o si es posible con imágenes de microscopía electrónica.

Para complementar los métodos de descripción y mejorar su beneficio, se sugiere verificar su eficacia en rocas más variables textural y composicionalmente, además de realizar ensayos de carga para correlacionar los parámetros mineralógicos determinados con esfuerzos específicos. Una vez hechas estas relaciones, es posible comparar con la maquinaria industrial y aconsejar de manera distinta en la selección del material que ingresa en la conminución.

7. REFERENCIAS

- AGUIRRE, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central (provincia de Aconcagua). *Instituto de Investigaciones Geológicas*. Boletín N° 9: 70 pp.
- ARMIJO, R.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E.; LACASSIN, R.; RAULD, R.; THIELE, R. & VARGAS, G. 2010. The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*. Vol. 29, N° 2: 34 pp.
- AWUAH-OFFEI, K. 2018. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions. Rolla, EE.UU. 333 pp.
- AYLING, B.; DRAKOS, P.; PETTY, S.; ZEMACH, E. & ROSE, P. 2012. QEMSCAN (Quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy): capability and application to fracture characterization in geothermal systems. Proc, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reserve Eng. Stanford University. Stanford, California, EE.UU.
- BALLESTER, A.; SANCHO, J. & VERDEJA, L. 2000. Metalurgia Extractiva. Fundamentos. Ed. Síntesis. Vol. 1: 432 pp. España.
- BERNAOLA, J., CASTILLA, J., & HERRERA, J. 2013. Perforación y voladura de rocas en minería. Universidad Politécnica de Madrid. 256 pp. Madrid. España.
- BOND, F. 1952. The third theory of comminution. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Vol. 193: 484 pp.
- BRANTES, R & CANTALLOPTS, J. 2019. Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2018. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Disponible online (<https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%202018.pdf>). Ingreso octubre 2019. 28 pp.
- BRAVO, A.; HEIDE, G.; KOGAN, I. & POPOV, O. 2017. Application of conventional optical microscopy for the quantitative microstructural analysis of Freiberg gneiss. Informe Interno.
- CABRI, L.; RUDASHEVSKY, N.; RUDASHEVSKY, V. & OBERTHÜR, T. 2008. Electric-Pulse Disaggregation (EPD), Hydroseparation (HS) and their use in combination for mineral processing

and advanced characterization of ores. En *Canadian Mineral Processors 40th Annual Meeting, Proceedings*. Vol. 14: 211-235.

CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.; GANS, F.; KAY, S.M.; MUÑOZ, N.; WYSS, A. & ZURITA, E. 2002. Evidence for cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 15: 115-137.

DJORDJEVIC, N. 1999. A two-component model of blast fragmentation. In: *Proceedings of the 6th international symposium for rock fragmentation by blasting*, Johannesburg, South Africa. 213–219 pp.

EDUCARCHILE 2005. Regionalización de Chile. Mapa político administrativo en página Web (ww2.educarchile.cl/UserFiles/P0001/Image/CR_Imagen/Mapas%20IGM/mapas_chile/regionalizacion_conara.gif). Ingreso julio 2019.

EDUCARCHILE 2005. Regiones de Chile. Mapa político administrativo V Región página Web (ww2.educarchile.cl/Userfiles/P0001/Image/CR_Imagen/Mapas%20IGM/5ta_region/5_division_politico_administr.gif). Ingreso julio 2019.

EDUCARCHILE 2005. Regiones de Chile. Mapa político administrativo VII Región página Web (ww2.educarchile.cl/Userfiles/P0001/Image/CR_Imagen/Mapas%20IGM/7ma_region/division_politico_administr.gif). Ingreso julio 2019.

GANNA, P. & WALL, R. 1997. Evidencias geocronológicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K-Ar de un hiatus cretácico superior-eoceno en Chile central (33-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 24: 145-163.

GÓMEZ, C. & BARAHONA C. 2003. Copper 2003 – Cobre 2003. Mineral Processing. Santiago. Chile. Vol. 3: 1-14.

GOTTLIEB, P.; HO TUN, E.; SUTHERLAND, D. & WILKIE, G. 2000. Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. Vol. 52: 24-27.

GONZÁLEZ-FERRÁN, O. 1994. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar: 640 pp. Chile.

- GRIFFITH A. A. 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil Trans. Royal Society*, Vol. A221: 163.
- GULISIANO, C. A. & DAMBORENEA S. E., 1993. Formación Auquenco. Léxico estratigráfico de la Argentina. Volumen 9: Jurásico. *Asociación Geológica Argentina, Serie B*. Vol. 21: 56-58. Buenos Aires, Argentina.
- HALLER, M.J.; FOLGUERA, A.; GARDINI, M.; OSTERA, H. & PESCE, A. 1994. Vulcanoestratigrafía reciente y eruptividad del volcán Peteroa. Congreso Geológico Chileno. N° 7. Actas 1: 319-323. Concepción.
- HALLER, M. & RISSO, C. 2011. La erupción del volcán Peteroa (35°15'S, 70°18'O) del 4 de septiembre de 2010. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. 68 (2): 295-305.
- HENRY, D. 2007. Scanning Electron Microscopy - Cathodoluminescence (SEM-CL) Louisiana State University. EE.UU.
- HINO, K. 1956. Fragmentation of rock through blasting and shock wave theory of blasting. In The 1st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association. Colorado. EE.UU.
- HUKKI, R. 1975. The principles of comminution: An analytical summary. *Engineering and Mining Journal*. Vol 176: 106-110.
- INGLIS, C. E. 1913. Stresses in the Plate due to the Presence of Cracks and Sharp Corners. *Trans. Inst. Naval Arch.* Vol. 60: 219 pp.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS. 2008. Manual del especialista en voladura. 17^a Edición: 671 pp. Cleveland, Ohio, EE.UU.
- JESWIET, J. & SZEKERES, A. 2016. Energy consumption in mining comminution. *Procedia CIRP Conference on Life Cycle Engineering*. Vol 48: 140-145. Kingston, Canada.
- KICK, F. 1885. *Das Gesetz der proportionalen Widerstands und seine Anwendung*, Felix. Leipzig.
- KLEIN, C. & HURLBUT, C. 1996. Manual de Mineralogía. Tomo 1. Ed. Reverté. 368 pp. España.
- KLICHOWICZ, M. & LIEBERWIRTH, H. 2016. Modeling of realistic microstructures as key factor for comminution simulations. *Proceedings IMPC 2016*. Vancouver. Canada.

- KLOHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. *Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile*. Boletín. Vol. 8: 1–95.
- LANÉS, S. 2002. Paleoambientes y Paleogeografía de la primera transgresión en Cuenca Neuquina, Sur de Mendoza. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (Inédita). 403 pp. Buenos Aires, Argentina.
- LE MAITRE, R. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. *Journal of Petrology*. Vol. 17(4): 589-598.
- LEVI, B.; AGUIRRE, L.; NYSTROM, L.O.; PADILLA, H. & VERGARA, M. 1989. Low-grade regional metamorphism in the Mesozoic-Cenozoic volcanic sequences of the Central Andes. *Journal of Metamorphic Geology*. Vol. 7: 487-495.
- LEWIS, F.; BHAPPU, R. & COBURN, J. 1976. Comminution: A guide to size reduction system design. *Mining Engineering*. Vol 28.
- LINARES E. & GONZÁLEZ, R. 1990. Catálogo de Edades Radiométricas de la República Argentina. Parte I: años 1957-1987. Asociación Geológica Argentina, Serie (1). Publicaciones en CD-ROM. N° 1. Buenos Aires, Argentina.
- MAFFINI, M.; HALLER, M. & DEL VALLE, H. 2010. Análisis comparativo de los cráteres de explosión del volcán Peteroa. Encuentro Internacional de Ciencias de la Tierra 6, Acta de Resúmenes, Malargüe, Mendoza, Argentina.
- MCQUISTON, F. & SHOEMAKER, R. 1978. Primary Crushing Plant Design. AIMME. New York, EE.UU.
- MINSOC (Russian Mineralogical Society) 2007. Base de datos en página Web (www.minsoc.ru/FilesBase/QemScan0803.pdf). Ingreso julio 2019.
- NARANJO, J.A.; HALLER, M.J.; OSTERA, H.A.; PESCE, A.H. & SRUOGA, P. 1999. Geología y peligros del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Andes del Sur (35°15'S), Región del Maule, Chile-Provincia de Mendoza, Argentina. *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Boletín N° 52: 55 pp.

NULLO, F.; BALDAUF, P.; BOUZA, P.; COMBINA, A.; DIMIERI, L. & STEPHENS, G. 2005. Hoja Geológica 3569-III / 3572-IV Malargüe, Provincia de Mendoza. *Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino*. Boletín N° 346: 85 pp. Buenos Aires.

OPENCOURSEWARE. Universidad de Oviedo. Cristalografía. Difractogramas en página Web (ocw.uniovi.es/pluginfile.php/677/mod_resource/content/1/1C_C11812_A/cristalografia/18/difractograma.htm). Ingreso julio 2019.

PARTRIDGE, A. 1978. Principles of comminution. *Mine and Quarry*. Vol 7: 70 pp.

POOLER, R. 2014. Optimización del método de análisis mineralógico para la caracterización de materiales de lastre del yacimiento Río Blanco, División Andina, Codelco. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción. 185 pp.

POPOV, O. 2007. Beitrag zur mathematisch-petrographischen Gefügecharakterisierung für die Beurteilung der Festgesteine hinsichtlich ihrer Aufbereitung und ihrer Produkteigenschaften. TU Bergakademie Freiberg. Freiberg. Alemania. Disponible online (<https://d-nb.info/985330716/34>). Ingreso octubre 2019. 197 pp.

POPOV, O.; FOLGNER, T. & LIEBERWIRTH, H. 2014a. Quantitative characterization of rocks to predict the influence of the rock on relevant product properties and system parameters. Part 1: Application of quantitative microstructural analysis. *AT Mineral Processing*. Vol. 55, N° 7-8: 76 – 88.

POPOV, O.; FOLGNER, T. & LIEBERWIRTH, H. 2014b. Quantitative characterization of rocks to predict the influence of the rock on relevant product properties and system parameters. Part 2: Selected examples. *AT Mineral Processing*. Vol. 55, N° 10: 54 – 63.

POWDER DIFFRACTION FILE. 1967. Joint committee on powder diffraction standards (JCPDS). American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, EE.UU. 9-185 pp.

POWELL, M.; MORRELL, S. & LATCHIREDDI, S. 2001. Developments in the understanding of South African style SAG mills. *Minerals Engineering*. Vol. 14(10): 1143-1153.

RIVANO, S.; GODOY, E.; VERGARA, M. & VILLARROEL, R. 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32-34 S). *Andean Geology*. Vol. 17(2): 205-214.

- SANDER, B. 1950. Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Zweiter Teil: Die Korngefüge, Springer – Verlag. Wien und Innsbruck.
- SELLÉS, D. 2000. La relación discordante entre las Formaciones Abanico y Las Chilcas en la localidad de Angostura: implicancias regionales. Congreso Geológico Chileno, N° 9. Actas 1: 555-558. Puerto Varas.
- SHI, F.; MANLAPIG, E. & ZUO, W. 2014. Progress and challenges in electrical comminution by high-voltage pulses. *Chemical Engineering & Technology*. Vol. 37, N° 5: 765-769.
- TANDON, R. & GUPTA, V. 2013. The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya. *Engineering Geology*. Vol. 153: 125–143.
- TORMEY, D. 1989. Geology and Geochemistry of the active Azufre-Planchon-Peteroa volcanic center 35°15'S, Southern Andes: Implications for Cordilleran arc magmatism. Ph.D. Thesis (Unpublished). Massachusetts Institute of Technology: 331 pp., EE.UU.
- ÜNDÜL, Ö.; AMANN, F.; AYSAL, N. & PLÖTZE, M. 2015. Micro-textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks. *Engineering Geology*. Vol. 193: 267-275.
- VAUGHAN, D. & WOGELIUS, R. 2013. Environmental mineralogy II. The European Mineralogical Union and the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland. Vol. 13. London, UK.
- VERGARA, M.; LEVI, B. Y VILLARROEL, R. 1993. Geothermal-type alteration in a burial metamorphosed volcanic pile, central Chile. *Journal of Metamorphic Geology*. Vol. 11: 449-454.
- VON RITTINGER, P. 1867. Lehrbuch der Aufbereitungs Kunde, Ernst and Korn. Berlin.
- WANG, E.; MANLAPIG, E. & SHI, F. 2012. Mineral Liberation by High Voltage Pulses and Conventional Comminution with Same Specific Energy Levels. *Minerals Engineering*. Vol. 27-28: 28-36.
- WHITE, L. 1976. Processing responding to new demands. *Engineering and Mining Journal*. 219 pp.

WILLS, B. & NAPIER, T. 2006. Mineral processing technology, 7th edn. Elsevier Ltd. New York, EE.UU. 248-249 pp.

ZUO, W.; MANLAPIG, E. & SHI, F. 2015. The effect of metalliferous grains on electrical comminution of ore. International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile. Vol. 2: 106–115.



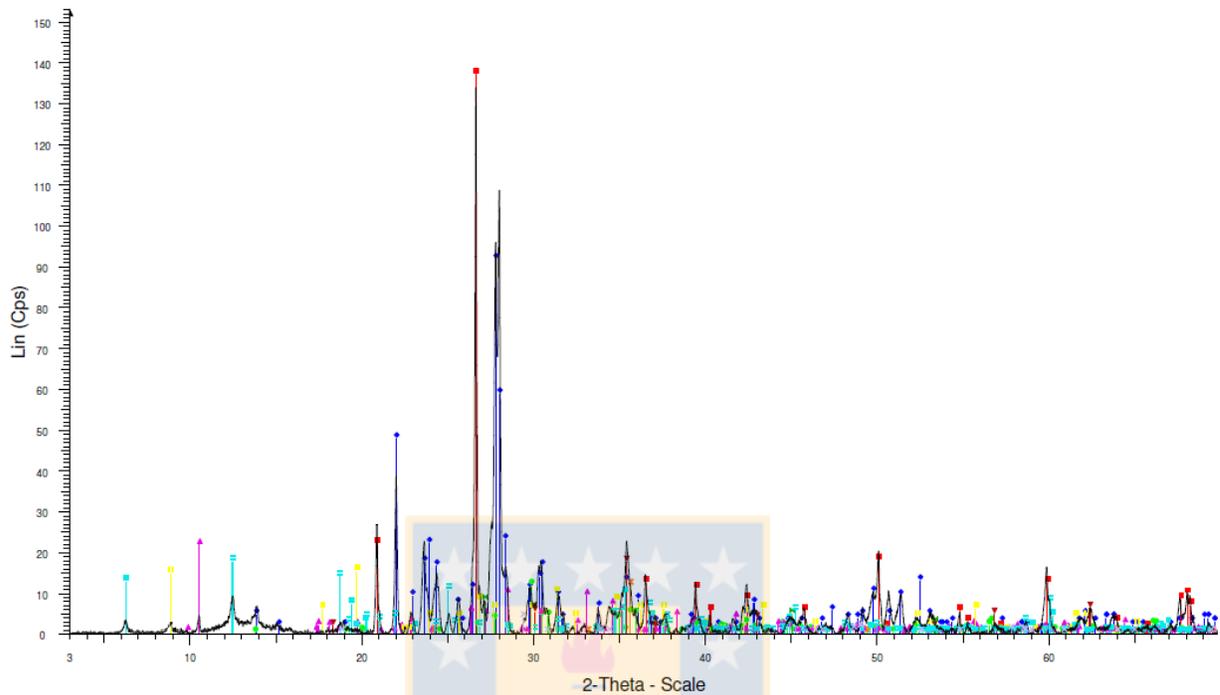
ANEXOS



ANEXO N° I

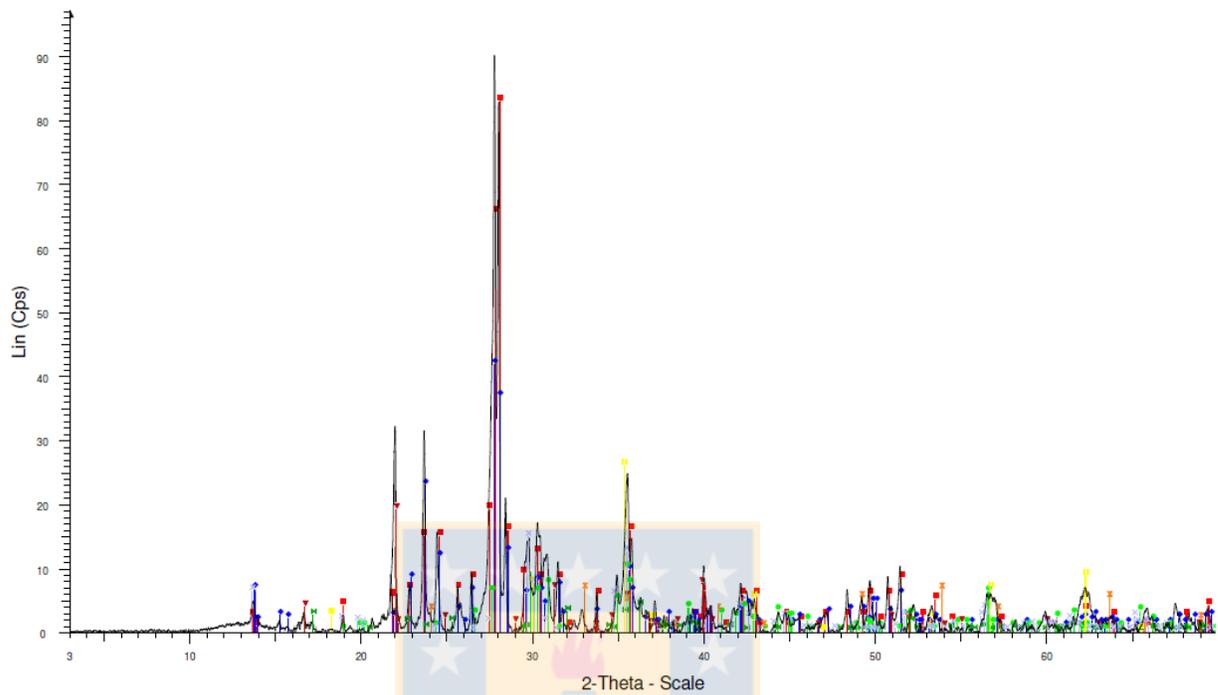


Difractograma Muestra A1 (Andesita)



- 3 - File: 3.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 69.930 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 141. s - Temp.:
 Operations: Strip kAlpha2 0.125 | Background 1.000.1.000 | Import
- 00-041-1481 (I) - Anorthite, Na-rich, disordered - $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$ - Triclinic - Y: 100.00 % - WL: 1.5406 - a 8.1
 - 00-046-1045 (*) - Quartz, syn - SiO_2 - Hexagonal - Y: 102.45 % - WL: 1.5406 - a 4.91344 - b 4.91344 - c 5.4052
 - 01-086-0005 (C) - Pyroxene - $(\text{Mg}_{0.944}\text{Fe}_{0.056})(\text{Ca}_{0.844}\text{Na}_{0.156}\text{Fe}_{0.014})(\text{Si}_2\text{O}_6)$ - Monoclinic - Y: 8.76 % - W
 - 01-073-1135 (C) - Amphibole - $\text{Al}_3.2\text{Ca}_3.4\text{Fe}_4.0\text{K}_6\text{Mg}_6.0\text{Na}_{1.0}\text{Si}_{12.8}\text{O}_{44}(\text{OH})_4$ - Monoclinic - Y: 16.16 % - WL
 - 00-010-0482 (D) - Muscovite, lithian, 2M1 - $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$ - Monoclinic - Y: 7.40 % - WL: 1.5406 - a
 - 01-086-1346 (C) - Magnetite - $\text{Fe}_2.962\text{O}_4$ - Cubic - Y: 13.00 % - WL: 1.5406 - a 8.40780 - b 8.40780 - c 8.4078
 - 01-073-0603 (C) - Hematite, syn - Fe_2O_3 - Rhombo.H.axes - Y: 8.70 % - WL: 1.5406 - a 5.03420 - b 5.03420 - c
 - 01-088-2464 (C) - Sphalerite group - $(\text{Zn}_{0.94}\text{Mn}_{0.06})\text{Se}$ - Cubic - Y: 5.93 % - WL: 1.5406 - a 5.68700 - b 5.6870
 - 01-083-1380 (C) - Chlorite, chromian - $\text{Mg}_5.0\text{Al}_0.76\text{Cr}_0.23\text{Al}_0.96\text{Si}_3.04\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ - Triclinic - Y: 13.12 % - WL: 1
 - 01-071-0507 (C) - Chalcopyrite - CuFeS_2 - Tetragonal - Y: 2.83 % - WL: 1.5406 - a 5.28900 - b 5.28900 - c 10.4

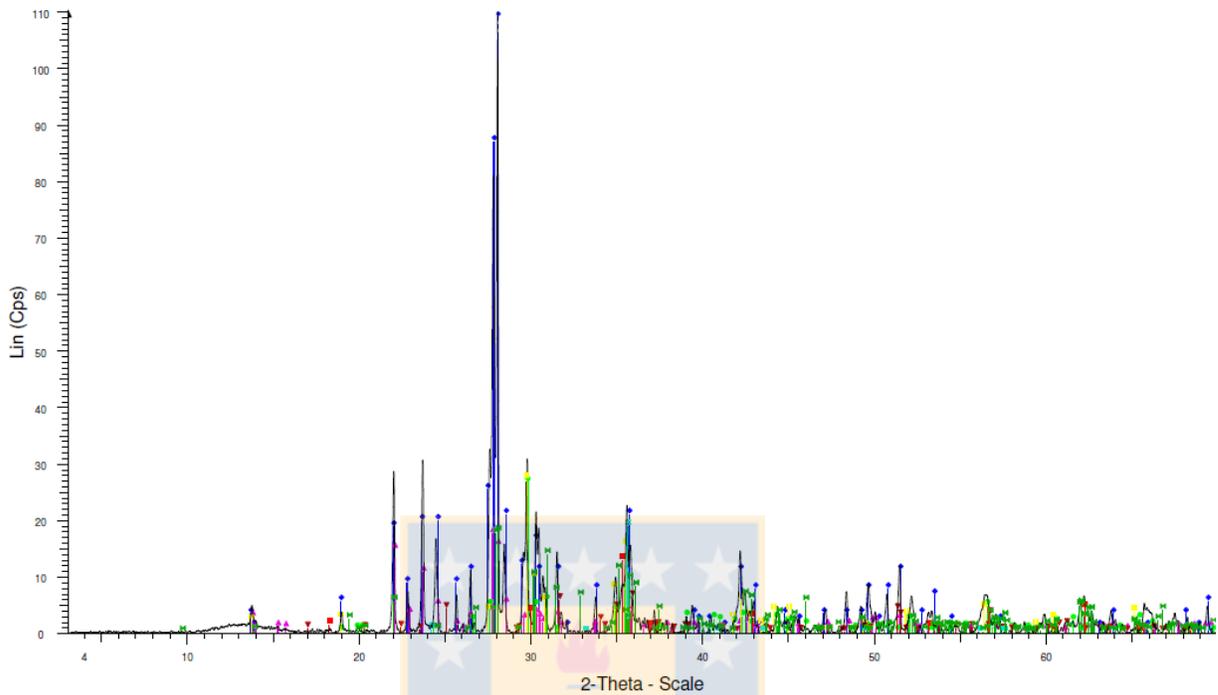
Difractograma Muestra B2 (Basalto)



2 - File: 2.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 69.930 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 141. s - Temp.:
 Operations: Smooth 0.068 | Strip kAlpha2 0.500 | Background 0.977, 1.000 | Import

- 00-041-1481 (I) - Anorthite, Na-rich, disordered - $(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$ - Triclinic - Y: 92.08 % - WL: 1.5406 - a 8.18
- ◆ 00-020-0572 (D) - Albite, disordered - $NaAlSi_3O_8$ - Triclinic - Y: 46.37 % - WL: 1.5406 - a 8.14900 - b 12.88000
- 00-011-0654 (D) - Diopside - $CaMg(SiO_3)_2$ - Monoclinic - Y: 27.61 % - WL: 1.5406 - a 9.76100 - b 8.92600 - c 5
- ▼ 01-088-1995 (C) - Forsterite ferrous - $Mg_{1.214}Fe_{0.786}SiO_4$ - Orthorhombic - Y: 4.44 % - WL: 1.5406 - a 4.78610
- ⊠ 00-003-0800 (D) - Hematite - alpha- Fe_2O_3 - Rhombo.H.axes - Y: 7.32 % - WL: 1.5406 - a 5.03500 - b 5.03500 -
- 00-012-0220 (I) - Fayalite, Mn-rich - $(Fe,Mn)_2SiO_4$ - Orthorhombic - Y: 7.40 % - WL: 1.5406 - a 4.86800 - b 10.5
- ▯ 01-086-1349 (C) - Magnetite - $Fe_2.957O_4$ - Cubic - Y: 28.80 % - WL: 1.5406 - a 8.42450 - b 8.42450 - c 8.4245
- ⊠ 01-086-0745 (C) - Pyroxene, syn - $(Na_{0.25}Ca_{0.75})(Sc_{0.25}Zn_{0.75})(Si_2O_6)$ - Monoclinic - Y: 21.10 % - WL: 1.540

Difractograma Muestra B3 (Basalto Vesicular)



- 1 - File: 1.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.042 ° - End: 69.964 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 141. s - Temp.:
 Operations: Displacement -0.073 | Smooth 0.056 | Smooth 0.044 | Strip kAlpha2 0.500 | Background 0.977,1.00
- ◆ 00-041-1481 (I) - Anorthite, Na-rich, disordered - $(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$ - Triclinic - Y: 100.00 % - WL: 1.5406 - a 8.1
 - ▲ 00-020-0572 (D) - Albite, disordered - $NaAlSi_3O_8$ - Triclinic - Y: 15.99 % - WL: 1.5406 - a 8.14900 - b 12.88000
 - 00-011-0654 (D) - Diopside - $CaMg(SiO_3)_2$ - Monoclinic - Y: 17.12 % - WL: 1.5406 - a 9.76100 - b 8.92600 - c 5
 - ▨ 00-024-0201 (I) - Augite - $Ca(Fe,Mg)Si_2O_6$ - Monoclinic - Y: 17.69 % - WL: 1.5406 - a 9.78300 - b 8.96500 - c 5
 - ▼ 01-080-0948 (C) - Olivine - $Fe_2(SiO_4)$ - Orthorhombic - Y: 5.68 % - WL: 1.5406 - a 4.82100 - b 10.45600 - c 6.0
 - 01-086-1355 (C) - Magnetite - $Fe_2.942O_4$ - Cubic - Y: 11.59 % - WL: 1.5406 - a 8.42610 - b 8.42610 - c 8.4261
 - ◄ 01-086-0162 (C) - Orthopyroxene - $(Fe_{0.104}Mg_{0.896})(Fe_{0.703}Mg_{0.254}Ca_{0.043})(Si_2O_6)$ - Orthorhombic - Y: 16
 - ▤ 01-073-0603 (C) - Hematite, syn - Fe_2O_3 - Rhombo.H.axes - Y: 17.12 % - WL: 1.5406 - a 5.03420 - b 5.03420 -

ANEXO N° II

Tablas descripción granos por corte



Corte Zy Muestra A1 (Andesita)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Dominio	Interacción
A1	Plg	1,8x1	S	A	N	A	CA1 CP1
A1	Plg	1,5x0,7	S	A	N	A	CA1
A1	Plg	2x0,5	S	A	N	A	P1
A1	Plg	1x0,8	S	M	N	A	A1 CA1
A1	Anf	1,7x1	A	B	N	A	A1
A2	Plg	1,7x1,2	S	A	N	A	CP1 A1
A2	Plg	1,2x1,1	S	A	N	A	N
A2	Plg	1x1	S	A	N	A	A1
A2	Plg	1,5x1	S	A	N	A	CA1
A2	Plg	1,4x0,6	S	M	N	F	CP2
A3	Plg	2x0,5	S	A	N	A	N
A3	Plg	0,6x0,9	E	A	N	A	A1
A3	Plg	1x0,5	S	A	N	F	CA1 P1
A3	Plg	1,4x1,3	S	A	N	F	C1 CP1
A3	Plg	1x0,6	S	A	N	A	N
A4	Plg	4x4	A	A	N	A	CP3
A4	Plg	1,7x1	S	A	N	A	CP1
A4	Plg	2x1,5	S	A	N	A	A1 P1
A4	Plg	1,5x0,5	E	A	N	A	CA1 CP1
A4	Plg	1x0,8	S	A	N	A	CA2 CP2
A5	Plg	1,5x1	E	A	N	A	CA1 P2
A5	Plg	1,3x1	S	A	N	A	CA1
A5	Plg	1x0,8	E	A	N	F	CA1 CP1
A5	Plg	1,3x0,5	S	A	N	A	CP3
A5	Plg	3x3	S	M	N	F	CA2 P1
B1	Plg	2,8x1,3	S	A	N	A	A2 CP1
B1	Plg	2,3x1,5	S	A	N	A	A1 P2
B1	Plg	1,5x1	S	A	N	A	CA1 CP2
B1	Plg	1,3x0,8	S	A	N	A	A1
B1	Plg	1x0,8	S	A	N	A	CP3
B2	Plg	1,5x0,8	S	A	N	F	CA1 CP1
B2	Plg	1,5x0,5	E	A	N	F	CP1
B2	Plg	1,3x1	S	A	N	A	A1 CP1
B2	Plg	0,8x0,5	S	A	N	A	A1 CA1 CP1
B2	Plg	1,3x1	S	A	N	A	A1 CP2
B3	Plg	1,8x1,3	S	M	N	A	CA1 CP1
B3	Plg	0,8x0,8	E	A	N	F	CA1
B3	Plg	1,8x0,8	S	A	N	A	CA3
B3	Plg	1,8x0,8	E	A	N	A	CA1
B3	Plg	0,8x0,8	S	A	N	A	A1 CP2
B4	Plg	1x1	S	A	N	F	A1 CA1
B4	Plg	1,6x0,6	E	A	N	A	P1 A2
B4	Plg	1,5x0,7	S	A	N	A	CA1
B4	Plg	1,4x0,7	S	A	N	A	A1 CP1

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Dominio: F-Fractura, A-Alteración. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

B4	Plg	0,7x0,7	S	A	N	F	CA2 CP4
B5	Plg	1,5x1	S	A	N	F	CA1
B5	Plg	1,8x1,3	S	A	N	A	N
B5	Plg	1,3x0,8	S	A	N	A	CA1 CP1
B5	Plg	1x0,3	A	A	N	A	CP2
B5	Plg	0,7x0,7	S	A	N	F	A1
C1	Plg	1,5x0,8	A	A	N	A	CA2
C1	Plg	1,1x0,2	E	A	N	A	A1 CA2
C1	Plg	0,8x0,5	S	A	N	A	CA1
C1	Plg	0,8x0,5	E	M	PM	A	CA1
C1	Plg	1x1,1	A	A	N	A	CA1
C2	Plg	1x0,5	S	A	N	F	CA1
C2	Plg	1,6x0,8	S	A	N	A	P1 CP1
C2	Plg	1,1x0,5	S	A	N	A	CP1 CA1
C2	Plg	1x0,5	S	A	N	F	CP2
C2	Plg	0,5x0,5	E	M	N	F	CP2
C3	Plg	1,6x0,8	S	A	N	A	CP2
C3	Plg	0,5x0,5	A	A	N	A	CP1
C3	Plg	1x0,5	E	A	N	A	CP1
C3	Plg	1,1x0,5	S	A	N	A	CA1 P1
C3	Plg	1x0,4	A	A	N	A	A2
C4	Plg	1,5x0,8	S	A	N	A	N
C4	Plg	1,6x0,8	S	A	N	A	N
C4	Plg	1,5x0,6	A	A	N	A	A1 CP1
C4	Plg	1x0,5	S	A	N	F	A1 CA1
C4	Plg	1x0,6	S	A	N	A	A2 CA1
C5	Plg	2x1,3	S	A	N	A	A1
C5	Plg	1,5x0,6	S	A	N	A	CA1
C5	Plg	1,3x1,1	S	A	N	F	CA1 CP1
C5	Cpx	1x0,8	S	M	PM	A	A1
C5	Plg	1,1x0,5	S	A	N	A	P1 CA2

Corte Yx Muestra A1 (Andesita)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Dominio	Interacción
A1	Plg	1x0,5	S	M	PM	F	N
A1	Plg	1,1x0,5	S	M	N	A	CP1
A1	Plg	1x1	E	B	N	A	CA1
A1	Plg	0,6x0,5	S	A	N	A	A1
A1	Plg	1,4x0,6	S	A	N	A	CA1
A2	Plg	1,8x0,5	E	M	N	F	CP2
A2	Plg	0,8x0,4	E	B	PM	F	P1
A2	Plg	1x0,7	S	M	N	F	A1 CP1 CA1
A2	Plg	1,1x1	A	M	N	A	P1 CP1
A2	Plg	1x0,5	S	A	N	F	CP2
A3	Plg	1,5x1	S	M	PM	F	CP1

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Dominio: F-Fractura, A-Alteración. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

A3	Plg	1,5x1,5	E	A	N	F	P1 A1 CP3
A3	Plg	1,5x0,5	E	A	N	F	N
A3	Plg	2x0,7	S	A	N	F	A1 CP1
A3	Anf	1,8x0,5	S	B	PM	A	P2 CP2
A4	Plg	2,5x1,5	S	M	N	A	CA1 CP2
A4	Plg	1x1,5	E	A	N	F	CA1
A4	Plg	1,5x1,5	A	M	N	A	CA1 P1
A4	Cpx	1,5x1,3	S	B	PM	A	CA2
A4	Plg	1x0,5	E	M	N	F	P1 A1
A5	Cpx	0,7x0,7	S	B	PM	F	A2
A5	Cpx	1x0,8	S	B	PM	F	A1
A5	Plg	1,5x0,5	E	A	N	A	CA1
A5	Plg	0,5x0,3	S	A	PM	A	CA1
A5	Plg	1,1x1	S	A	N	A	CA1 P1
B1	Plg	1,7x0,5	E	A	N	F	A1 P1
B1	Plg	1x0,5	E	M	N	F	CP2
B1	Plg	1,1x0,6	E	A	N	F	CA1
B1	Plg	1,2x0,5	S	M	N	A	CP1 A1
B1	Plg	1x0,5	S	B	N	F	CP1 A1
B2	Plg	1,9x1	A	A	N	F	A1 P1
B2	Plg	1,6x1,4	E	A	N	A	CA2
B2	Plg	2x0,5	S	A	PM	F	P1 CP1
B2	Plg	1,5x1	E	A	N	A	CA1 CP1
B2	Plg	2x0,6	S	A	N	A	P2
B3	Plg	2x1,2	S	A	PM	A	A3
B3	Plg	1x0,5	S	M	N	A	A1
B3	Plg	1,5x1	A	A	N	F	CP1
B3	Plg	1x0,4	E	M	PM	A	P1
B3	Plg	1,2x0,6	E	M	N	A	A1/CP1
B4	Plg	1,5x0,7	S	A	PM	F	CA1
B4	Plg	1x0,5	S	A	N	F	A1 CP1
B4	Plg	1x0,5	E	A	N	F	P2
B4	Plg	1x0,5	S	A	PM	F	CP1
B4	Plg	1,2x1	S	A	PM	F	CA1 CP1
B5	Plg	1,5x1,5	S	A	N	A	CA2
B5	Plg	0,8x0,5	S	M	N	A	N
B5	Plg	1,6x1	S	A	N	A	CP2
B5	Plg	1,2x1	E	M	N	F	P1
B5	Plg	1,2x0,8	E	M	N	F	CP1 CA1
C1	Plg	2x1,5	S	A	N	A	A1
C1	Plg	2x1	S	A	N	F	N
C1	Plg	1,5x0,5	S	M	N	A	A1 CP1
C1	Plg	1,5x0,6	S	M	N	F	A1 P1 CA1
C1	Plg	1x1	A	A	N	F	P1 CA2 CP1
C2	Plg	1,5x1,5	A	A	N	F	CP1
C2	Cpx	1x1	S	B	PM	A	CP1
C2	Plg	1,1x0,5	S	M	N	F	CP1 CA1
C2	Plg	1,5x0,5	E	B	PM	F	A1 CP2
C2	Anf	0,9x0,6	S	B	N	A	N

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Dominio: F-Fractura, A-Alteración. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

C3	Plg	1,1x0,7	S	M	PM	F	CP1
C3	Plg	1x1	S	M	N	F	CA1 CP1
C3	Plg	1,4x0,5	S	M	N	A	A2 P1
C3	Plg	1,4x1,5	E	M	PM	F	N
C3	Cpx	0,6x0,7	S	B	PM	A	CP1 A1
C4	Plg	1,3x0,6	S	A	PM	F	CP2 A1
C4	Cpx	1x0,5	A	B	PM	A	A2
C4	Plg	1,5x1,5	A	A	N	F	CP2 A1
C4	Plg	1,5x0,5	S	A	N	A	CP2
C4	Plg	1,3x0,5	E	A	N	A	CP2
C5	Plg	1,8x0,7	S	M	N	F	CP1
C5	Plg	1,5x1	S	A	N	F	CP1
C5	Plg	1,5x1,3	S	A	N	A	A1
C5	Plg	1,3x0,8	S	A	N	A	A1 CP1
C5	Plg	0,8x0,8	S	A	N	A	CA2

Corte Zx Muestra A1 (Andesita)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Dominio	Interacción
A1	Plg	2x0,7	E	A	N	F	A1 CP1
A1	Plg	1,5x0,3	S	A	N	F	CA1
A1	Plg	1x0,5	S	A	N	F	P1
A1	Plg	2x0,5	E	A	N	A	P1 CP1
A1	Plg	0,6x0,4	S	A	N	A	CP1 A1
A2	Plg	2x0,5	E	A	N	A	CP3
A2	Plg	1,8x1,8	S	A	N	F	CA2
A2	Plg	1,6x1	S	A	N	A	CP3
A2	Plg	1,5x0,9	S	A	N	A	A1 CA1
A2	Plg	1x0,9	E	A	N	F	NO
A3	Plg	1,1x0,4	E	A	N	F	P1
A3	Cpx	1x0,6	A	B	PM	A	A1 P1 CA1
A3	Cpx	1,5x0,5	S	M	PM	A	A3
A3	Plg	1,2x0,5	E	A	N	F	A1
A3	Plg	1,1x0,6	S	A	N	A	A1 CA1
A4	Plg	3x0,4	E	A	N	A	P1 CP3
A4	Plg	1,1x1	E	A	N	A	CP1
A4	Plg	1x0,6	E	A	N	A	A1 CA1
A4	Plg	1,5x0,7	A	A	N	A	A1
A4	Plg	1,1x1	E	A	N	A	A1
A5	Plg	1,5x0,5	S	A	N	A	CA1 P2
A5	Plg	1,1x0,8	E	A	N	A	P1 CP1
A5	Plg	2x1	A	A	N	A	A1 CA1
A5	Plg	1x0,5	E	A	N	A	P2 CP2
A5	Plg	0,7x0,4	E	A	N	F	A1 CP1
B1	Cpx	1,5x0,6	S	M	PM	A	CP2 P1

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Dominio: F-Fractura, A-Alteración. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

B1	Plg	2x0,5	E	A	N	A	A1 P1
B1	Plg	1,5x0,8	S	A	N	F	A2
B1	Plg	0,9x0,5	S	A	N	A	A1 P1
B1	Plg	1x0,9	A	A	N	A	A1
B2	Plg	1,5x1	A	A	N	A	A1 CA1
B2	Plg	1,3x0,5	E	A	N	F	A1 CP1
B2	Plg	1x0,9	S	A	N	A	N
B2	Plg	1x0,9	E	A	N	F	P1
B2	Plg	0,7x0,3	S	A	N	F	CP1
B3	Cpx	1x0,8	A	B	N	A	A2
B3	Plg	1,5x1	E	A	N	F	N
B3	Plg	1,5x0,5	E	A	N	A	N
B3	Plg	1x0,5	S	A	N	F	CP1 A1
B3	Plg	1x0,5	A	A	N	A	CA2
B4	Plg	1,6x0,6	S	A	N	A	A1 CA1
B4	Plg	1x1,5	A	A	N	A	N
B4	Plg	1x0,9	S	A	N	A	A1
B4	Plg	1,3x0,4	S	A	N	F	CA2
B4	Plg	1x0,2	S	A	N	A	CP3
B5	Plg	1,9x1	S	A	N	A	CP3
B5	Plg	1,5x0,5	S	A	N	A	CA1
B5	Plg	1x0,9	S	A	N	F	P1
B5	Plg	1,1x0,6	S	A	N	A	A1
B5	Plg	1,1x1	S	A	N	A	N
C1	Plg	1,4x0,5	E	A	N	A	A1
C1	Plg	1,5x0,5	E	A	N	A	P1
C1	Plg	1,1x0,7	S	A	N	A	P2 CP1
C1	Plg	0,8x1	S	A	N	A	A1 P1
C1	Plg	0,8x1,4	A	A	N	A	A1 CA1
C2	Plg	0,7x0,7	E	A	N	A	A1
C2	Plg	1,1x0,9	S	A	N	F	P1
C2	Plg	0,9x0,5	E	M	N	F	A1 P1
C2	Plg	1,5x0,6	S	A	N	A	A1 CA1
C2	Plg	1,6x0,6	E	A	N	A	CP1 P1
C3	Plg	0,7x0,6	E	A	N	A	A1
C3	Plg	0,6x1,6	S	A	N	A	P1 CP2
C3	Cpx	0,5x1,1	S	M	PM	A	N
C3	Plg	1,6x0,5	E	A	N	F	CP3
C3	Plg	0,9x0,6	S	A	N	A	N
C4	Plg	1x1,1	E	A	N	A	CP2 CA1
C4	Plg	1,6x0,6	S	A	N	A	CP1
C4	Plg	1,6x0,6	S	A	N	A	CA2 CP1
C4	Plg	0,8x0,8	S	A	N	A	N
C4	Plg	1,3x0,8	S	A	N	A	CA1 CP3
C5	Plg	1,3x0,4	S	A	N	A	CP2
C5	Plg	1,1x0,5	E	A	N	F	P1
C5	Plg	1,3x0,8	S	A	N	A	CA1
C5	Plg	1,1x0,6	E	A	N	A	N
C5	Plg	1,5x0,5	S	A	N	A	CP1

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Dominio: F-Fractura, A-Alteración. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene.

Corte Zy Muestra B2 (Basalto)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Interacción	Vidrio
A1	Plg	1,3x0,5	S	A	N	A1 CP1	N
A1	Plg	1x1,5	A	M	PM	CP2	S
A1	Plg	0,8x0,5	S	M	PM	CA1	S
A1	Olv	0,8x0,5	A	A	N	CA1	B
A1	Plg	0,6x0,4	E	A	N	P1	N
A2	Plg	2,3x1,8	S	A	N	N	P
A2	Plg	1,3x1,1	S	A	N	P2	S
A2	Plg	2x1,1	S	A	N	N	N
A2	Plg	1x0,5	S	M	PM	P1	N
A2	Plg	1,3x0,2	E	M	PM	A2	P
A3	Plg	0,8x0,8	S	M	N	CP2	S
A3	Plg	1,3x0,5	E	M	PM	CA1	P
A3	Olv	1,1x0,8	A	A	N	N	B
A3	Plg	1,8x1,5	S	A	N	N	S
A3	Plg	1,3x0,5	S	A	N	CA1	N
A4	Plg	1,8x0,6	E	M	N	CP1	N
A4	Cpx	0,6x0,5	A	M	M	A1 CP1	N
A4	Plg	1,1x0,8	E	B	N	N	N
A4	Plg	0,6x0,4	E	B	N	P1	S
A4	Plg	1x0,6	S	A	N	CA2	N
A5	Plg	1,1x0,5	S	M	N	CA2	P
A5	Cpx	1x0,5	S	A	N	CA2	N
A5	Plg	1x0,5	S	M	N	A1 CP1 CA1	N
A5	Plg	0,8x0,4	S	A	N	CA1 CP1	S
A5	Plg	0,8x0,6	A	M	N	CA2	S
B1	Plg	0,6x0,5	A	M	N	A1	N
B1	Plg	1,5x1	S	A	N	A1 CP1	S
B1	Plg	0,6x0,5	S	M	N	N	N
B1	Plg	1x0,4	E	A	PM	CP3	N
B1	Plg	0,x0,5	S	M	N	P2	S
B2	Plg	1,8x1	E	A	N	CP1	S
B2	Plg	1,6x1,6	S	M	N	CP1 P2	S
B2	Plg	1,8x0,5	S	A	N	A2	S
B2	Plg	1,8x0,6	S	A	N	A1	P
B2	Plg	1,6x0,6	S	A	N	P1	S
B3	Plg	1,5x0,6	S	B	N	A1 CP1	S
B3	Plg	1,3x1,1	S	A	N	A1 CP2	N
B3	Plg	1,1x0,5	E	A	PM M	CP2	S
B3	Plg	1,6x0,8	E	A	N	CA2	P
B3	Opx	0,6x0,6	A	A	PM M	A2	N
B4	Olv	0,6x0,5	A	A	N	A2	B
B4	Plg	1,1x0,5	E	B	PM	CP1	N
B4	Plg	1,1x0,5	E	M	N	CP1	N

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes.

B4	Plg	2,8x1	E	A	PM	A1	N
B4	Plg	0,8x0,8	E	A	N	A1	N
B5	Plg	1,6x1,1	A	A	N	CA1	S
B5	Plg	0,8x0,8	S	M	N	CA1	N
B5	Olv	0,5x0,5	A	A	N	A1	B
B5	Olv	0,4x0,4	A	A	N	A1 P1	B
B5	Plg	0,6x0,6	S	B	N	CA1	S
C1	Plg	1x0,6	S	A	N	N	N
C1	Plg	1,3x0,5	S	M	N	P1	N
C1	Plg	1,3x0,5	E	A	N	A1	P
C1	Olv	0,4x0,4	A	A	N	N	B
C1	Plg	0,8x0,4	E	B	N	CP3	N
C2	Plg	1,6x1	E	A	N	CA2	S
C2	Plg	1x0,5	S	A	N	P1	N
C2	Plg	1x0,5	E	M	PM	P2	N
C2	Plg	1,8x0,8	S	M	N	CP1	S
C2	Cpx	0,6x0,5	S	A	M	CA1	N
C3	Plg	0,8x0,4	E	A	N	A1 P1	P
C3	Plg	1x0,6	E	A	N	A1	P
C3	Olv	1,1x0,4	A	A	N	A2	B
C3	Cpx	1,3x0,6	S	A	PM M	A1 P1	N
C3	Plg	1,5x0,6	E	A	PM	A1 CA1	P
C4	Plg	0,6x0,5	E	M	PM	CA2	S
C4	Plg	0,8x0,8	E	M	N	CP2	S
C4	Plg	1,8x0,6	E	M	PM	A2 P2	N
C4	Plg	1,5x0,6	E	M	PM	A1	N
C4	Plg	1x0,2	E	B	PM	A2 P1	N
C5	Plg	1,6x0,6	S	A	N	N	N
C5	Plg	1x0,4	S	B	N	CA2	S
C5	Plg	1x0,5	S	A	N	A1 P1	P
C5	Plg	0,6x0,4	E	A	N	A2	P
C5	Olv	0,4x0,4	A	A	N	A2	B

Corte Yx Muestra B2 (Basalto)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Interacción	Vidrio
A1	Plg	2x0,5	E	M	PM	A2	P
A1	Olv	0,5x0,5	A	B	N	A2	B
A1	Plg	1,6x0,8	S	A	N	A1	S
A1	Plg	0,8x0,5	E	B	N	N	N
A1	Olv	1,1x1	A	A	N	A1	B
A2	Plg	1,1x0,6	E	M	N	N	N
A2	Plg	1,1x1,3	E	A	N	CA1	N
A2	Plg	1,6x0,5	E	A	PM	CP1	N

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes.

A2	Plg	2x0,8	E	M	PM	CP2 P1	N
A2	Plg	1x0,6	E	M	PM	P3	S
A3	Plg	2x1	E	M	PM	N	S
A3	Plg	2x0,6	S	A	PM	P2	S
A3	Plg	1,6x0,5	E	B	N	A1 CP2	N
A3	Plg	1,5x0,5	E	M	PM	CP1	N
A3	Plg	1,1x0,4	E	B	PM	A2 CP3	N
A4	Plg	2,3x0,8	E	A	PM	A1	N
A4	Plg	2,3x0,8	E	A	PM	A2	N
A4	Plg	0,8x0,4	E	B	PM	CP2	N
A4	Plg	1,3x0,4	E	A	PM	P2	N
A4	Plg	0,6x0,2	E	B	PM	CP2	N
A5	Plg	2,3x0,6	E	A	N	A1 CA1	N
A5	Plg	1,3x0,5	S	A	PM	CA1	S
A5	Plg	1,1x0,5	S	M	N	A3	S
A5	Plg	1,6x0,8	E	M	N	CP2 A1	S
A5	Plg	0,6x0,2	E	M	PM	CP3	S
B1	Plg	1,1x0,5	E	A	PM	CP2	N
B1	Plg	1x0,4	E	A	PM	CA1	N
B1	Plg	1x0,5	E	A	PM	A2	S
B1	Cpx	0,8x0,4	S	A	M	A1 CA2	N
B1	Plg	0,6x0,4	E	B	N	CP2	S
B2	Plg	0,8x0,5	E	A	PM	N	S
B2	Plg	0,5x0,4	E	B	PM	CP1	N
B2	Plg	1,1x0,5	E	A	N	P1	N
B2	Plg	0,8x0,2	E	M	PM	CA2	N
B2	Olv	0,3x0,3	A	A	N	A2 CA1	B
B3	Plg	1,6x0,5	E	A	PM M	N	N
B3	Plg	1,5x0,4	E	A	PM	CP3	N
B3	Plg	3x1,3	E	M	PM	CP2	S
B3	Plg	0,8x0,5	S	A	N	CP3	S
B3	Plg	0,8x0,4	S	A	PM	A1	S
B4	Plg	2x0,6	E	A	PM	N	S
B4	Plg	1,3x1,1	E	B	N	CP1	S
B4	Plg	3,4x1,1	E	A	PM M	CP1 P1	S
B4	Plg	1,1x0,5	E	A	N	P1	S
B4	Plg	1,1x0,2	E	A	PM	CP2	S
B5	Plg	0,5x0,5	E	M	N	CA2 CP1	S
B5	Plg	1,3x0,4	E	A	N	A1	N
B5	Olv	0,8x0,6	A	A	N	A2	N
B5	Plg	1x0,4	E	A	N	CA1	S
B5	Plg	1x0,4	E	A	PM	N	P
C1	Plg	1,8x0,6	E	B	N	CA1	S
C1	Plg	2,1x1	E	M	N	CA2	S
C1	Plg	1,5x1	E	A	N	A3	N
C1	Plg	1,6x1	E	A	N	A1	S
C1	Plg	2,1x0,5	E	A	PM	P2	N
C2	Plg	1,5x0,6	E	A	PM	A1 CA2	S

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes.

C2	Plg	1,6x1	E	A	PM	N	S
C2	Olv	0,6x0,6	A	A	N	CA1 CP1	N
C2	Olv	0,6x0,4	A	A	N	A1 CA1	B
C2	Plg	1,1x0,8	E	A	N	N	S
C3	Plg	0,8x0,5	A	A	N	A1	S
C3	Plg	1,8x0,8	S	A	PM	A1	N
C3	Plg	1,6x0,5	E	A	PM	CA1	P
C3	Plg	1,8x0,6	E	A	PM	A1	S
C3	Plg	1,1x0,8	E	A	N	A2	N
C4	Plg	1,5x0,8	E	A	N	N	P
C4	Plg	2,5x0,6	E	A	PM	A1	N
C4	Plg	1,3x0,5	E	B	PM	CA1	S
C4	Plg	0,5x0,4	E	B	M	A1 CA1	S
C4	Plg	0,8x0,3	E	A	N	A2	S
C5	Plg	1,6x0,4	E	A	PM	CA2	N
C5	Olv	0,6x0,6	A	A	N	A1	N
C5	Plg	1,1x0,8	E	A	PM	CP1	N
C5	Plg	1,5x0,4	E	A	PM	CA2	S
C5	Plg	1x0,4	E	A	N	A1 P1	N

Corte Zx Muestra B2 (Basalto)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Interacción	Vidrio
A1	Plg	1,3x0,4	E	M	PM	P2	S
A1	Plg	1x0,4	E	A	N	A1	P
A1	Plg	1x0,4	E	A	N	P1	S
A1	Plg	0,8x0,2	E	A	N	P1 CP2	P
A1	Plg	1x0,2	E	A	PM	P2	N
A2	Plg	3x0,8	E	A	N	CA3	S
A2	Plg	1,3x1,3	S	A	N	A1	S
A2	Plg	1,5x0,8	E	A	N	A1	N
A2	Plg	1,6x0,5	E	A	PM	N	P
A2	Plg	1,1x0,4	E	A	N	A1 CP1	N
A3	Cpx	2,5x1,5	S	A	N	P2	N
A3	Plg	5x3	E	A	N	CA1	P
A3	Plg	1x0,5	E	A	N	CA2	S
A3	Plg	0,8x0,4	E	M	PM	CA2	N
A3	Cpx	0,6x0,4	S	A	N	A2	N
A4	Plg	1,1x0,5	E	M	N	N	N
A4	Plg	1,1x0,5	S	M	N	CA1	S
A4	Plg	3,6x0,6	E	A	N	CA2 A1	S
A4	Plg	1,6x0,5	E	A	PM	CA1	N
A4	Plg	1,1x0,4	E	M	PM	CA2	N
A5	Plg	1,1x0,4	E	B	PM	N	N

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes.

A5	Plg	0,8x0,2	E	M	PM	A1	N
A5	Plg	0,8x0,2	E	M	N	N	N
A5	Plg	0,6x0,4	E	M	PM	A3	N
A5	Plg	0,6x0,4	E	B	N	A1	S
B1	Plg	1,1x1,1	S	A	N	A1 CA1	S
B1	Opx	1x0,8	E	A	N	CP4	N
B1	Plg	1,1x0,5	E	M	PM	CA1	N
B1	Plg	1,1x0,4	E	A	PM	CA2	N
B1	Plg	1,1x0,5	E	B	PM	A1 CP1	N
B2	Plg	1x0,6	E	A	N	CP1	S
B2	Plg	1,8x0,5	S	A	N	CP2	S
B2	Olv	0,6x0,5	A	A	N	A3	B
B2	Plg	1,6x0,5	E	A	PM	A1 CP2	N
B2	Plg	1,3x0,4	E	A	N	A1 P2	N
B3	Plg	3,5x1,1	E	A	PM	A1 P1	N
B3	Olv	0,5x0,5	A	A	N	N	B
B3	Plg	1,5x0,8	E	A	N	CP1	S
B3	Plg	1x0,4	E	A	PM	A2	N
B3	Plg	0,5x0,5	E	M	PM	P2	N
B4	Plg	0,8x0,5	S	B	N	P1	S
B4	Plg	3,6x1,8	E	A	PM	CP2	P
B4	Cpx	1,5x0,5	E	A	PM	A1 CA1	N
B4	Plg	1x0,4	E	A	PM	CP2	S
B4	Plg	1x0,5	E	A	PM	CP2 A1	N
B5	Plg	1,3x0,8	E	M	PM	N	S
B5	Cpx	1x0,4	E	A	M	A1 CA1	N
B5	Plg	1,1x0,5	E	A	PM	N	N
B5	Plg	1,1x0,4	E	M	PM	CP2	S
B5	Plg	1x0,5	S	B	N	N	S
C1	Plg	2,3x0,8	S	A	PM	CP1	S
C1	Plg	3,5x1	E	A	PM	A1	N
C1	Olv	1,3x0,5	A	A	N	A1 CA1	B
C1	Olv	1,3x0,6	A	A	N	A2	B
C1	Plg	0,8x0,4	E	B	PM	CP1	N
C2	Plg	0,6x0,6	E	M	N	CP1	S
C2	Plg	1,5x0,8	E	M	N	CP2	S
C2	Plg	1,3x0,4	E	A	PM	P1	N
C2	Plg	0,8x0,4	E	M	PM	P1 CP1	S
C2	Plg	1,1x0,4	S	M	PM	CA3	S
C3	Cpx	0,8x0,6	S	A	N	A1	N
C3	Plg	2x0,6	E	A	N	CA1 CP1	N
C3	Plg	1x0,5	S	M	N	N	N
C3	Plg	1,1x0,4	E	A	PM	P1	P
C3	Plg	1,1x0,4	E	B	PM	CA1	N
C4	Plg	4,4x1,4	E	A	PM	A2	N
C4	Plg	1,1x0,8	E	M	N	A1 CP2	P
C4	Plg	0,8x0,4	E	A	PM	A1 CA1	N
C4	Olv	0,4x0,4	A	A	N	A1	B

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes.

C4	Plg	0,8x0,4	E	M	N	A1 CA1	N
C5	Plg	2x1	A	M	PM	N	S
C5	Plg	1,6x0,8	S	A	N	A2	N
C5	Plg	1x0,8	E	M	N	P1 CP2	N
C5	Plg	0,8x0,5	E	A	N	P1	N
C5	Plg	1,3x0,4	E	A	PM	CA1	N



Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes.

Corte Zy Muestra B3 (Basalto Vesicular)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Interacción	Vidrio	Vesícula
A1	Plg	0,5x0,4	E	A	PM	A1	N	4
A1	Plg	0,5x0,2	E	A	N	A1	N	1
A1	Plg	0,4x0,2	E	M	N	A1	B	0
A1	Plg	0,6x0,2	E	M	N	CP1	B	2
A1	Plg	0,5x0,4	E	M	N	CP1	B	2
A2	Plg	0,8x0,4	S	A	N	N	S	1
A2	Plg	1x0,5	S	A	N	N	B	3
A2	Plg	0,6x0,5	S	A	N	N	S	3
A2	Plg	0,6x0,4	S	A	N	N	S	2
A2	Plg	0,6x0,5	S	A	N	N	B	2
A3	Plg	1,3x0,6	E	A	N	P1	S	2
A3	Plg	0,8x0,2	E	A	N	A1 CP1	S	2
A3	Plg	0,6x0,4	S	A	N	N	S	2
A3	Olv	0,4x0,2	A	A	N	N	N	4
A3	Plg	0,5x0,4	S	A	N	A1	S	2
A4	Olv	0,5x0,2	A	A	N	N	N	3
A4	Plg	0,5x0,4	S	M	N	P1	S	3
A4	Plg	0,5x0,4	S	A	N	CP1	B	2
A4	Plg	0,5x0,2	E	A	N	N	N	2
A4	Plg	0,4x0,2	S	M	N	A2	S	1
A5	Plg	1x0,5	E	A	PM	CA2 A1	P	2
A5	Plg	0,8x0,2	S	M	N	CP1	S	3
A5	Plg	0,6x0,4	S	M	N	N	B	3
A5	Olv	0,5x0,4	A	A	N	A1	N	2
A5	Plg	0,4x0,2	E	M	N	CP1	N	1
B1	Plg	0,5x0,4	A	B	N	N	S	3
B1	Plg	0,5x0,4	S	A	N	P2	S	2
B1	Plg	0,5x0,2	E	M	N	CP1	B	1
B1	Plg	0,6x0,5	S	A	PM	N	P	3
B1	Cpx	0,4x0,2	S	B	M	CA1	N	2
B2	Olv	0,5x0,4	S	A	N	A1 CP2	N	1
B2	Olv	0,8x0,6	A	A	N	A1 CP1	N	2
B2	Plg	1x0,2	S	B	N	N	P	4
B2	Plg	0,6x0,2	E	M	N	CP1	B	2
B2	Plg	0,5x0,2	E	M	N	CP1	P	2
B3	Plg	1,5x0,8	S	A	N	CP1	S	4
B3	Plg	1,1x0,5	E	M	N	P2	P	3
B3	Plg	1x0,2	S	A	N	N	P	3
B3	Olv	0,4x0,4	S	A	N	A1	N	1
B3	Plg	0,5x0,4	E	M	N	N	S	4
B4	Plg	1x0,4	E	M	N	P1	P	2
B4	Plg	0,5x0,4	E	A	N	N	P	2
B4	Plg	0,4x0,4	E	M	N	N	B	2

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes. Vesícula: N° contactos vesícula – mineral.

B4	Plg	0,8x0,4	E	A	N	CP1	S	3
B4	Plg	0,4x0,2	E	A	N	N	S	4
B5	Plg	1x0,4	E	A	N	N	P	3
B5	Plg	0,5x0,2	E	M	N	N	N	4
B5	Olv	0,4x0,4	A	M	N	A1	N	3
B5	Plg	0,5x0,5	E	M	N	A1	N	3
B5	Plg	0,5x0,4	S	A	N	N	B	4
C1	Plg	1,1x0,6	E	A	N	P1	S	3
C1	Plg	0,6x0,4	E	M	N	A1	S	2
C1	Plg	0,8x0,4	S	B	N	N	N	2
C1	Plg	0,6x0,2	E	A	N	A1	S	1
C1	Plg	0,5x0,5	E	A	N	N	S	3
C2	Plg	0,6x0,6	S	M	N	N	S	3
C2	Plg	0,6x0,4	S	M	M	N	N	1
C2	Plg	0,6x0,2	E	A	N	N	P	1
C2	Plg	0,5x0,4	S	A	N	CA1	B	1
C2	Plg	0,5x0,1	S	A	N	CA2 A1	P	2
C3	Olv	1,3x1	E	B	N	A2	N	2
C3	Olv	1,1x0,6	S	A	PM	A2	N	1
C3	Plg	0,8x0,2	E	M	N	P1	S	3
C3	Plg	0,5x0,4	S	M	N	A1	P	0
C3	Plg	0,4x0,4	S	B	N	N	S	2
C4	Plg	1,5x0,4	E	A	N	N	B	3
C4	Plg	0,6x0,2	E	M	N	N	P	2
C4	Plg	0,6x0,2	S	A	N	CP1 CA1	S	2
C4	Plg	0,5x0,2	S	A	N	N	P	3
C4	Plg	0,5x0,4	E	B	N	N	N	4
C5	Plg	0,8x0,5	E	B	N	CP1	N	2
C5	Plg	0,5x0,2	E	B	N	N	P	4
C5	Plg	0,6x0,2	E	B	PM	N	B	3
C5	Plg	0,2x0,2	E	B	N	CA1	B	1
C5	Plg	0,5x0,2	S	A	N	CP2	S	2

Corte Yx Muestra B3 (Basalto Vesicular)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Interacción	Vidrio	Vesícula
A1	Plg	1,6x0,8	E	B	N	A1	B	3
A1	Plg	0,4x0,1	E	B	N	CP1	N	0
A1	Plg	0,5x0,1	E	B	N	CA2	N	0
A1	Plg	0,4x0,4	E	B	N	N	B	2
A1	Plg	0,5x0,4	E	M	N	A1	N	0
A2	Plg	2x1,1	E	A	PM	N	N	4
A2	Plg	1,1x0,4	E	A	N	N	N	2
A2	Plg	0,6x0,5	E	M	N	A3	S	1

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes. Vesícula: N° contactos vesícula – mineral.

A2	Plg	0,8x0,2	E	M	N	A1	N	2
A2	Plg	0,5x0,2	S	M	N	N	S	2
A3	Plg	2x1	E	A	PM	P1	P	4
A3	Plg	0,6x0,4	S	A	N	N	S	1
A3	Plg	0,6x0,5	S	A	PM	CP2	S	4
A3	Plg	0,8x0,4	E	A	PM	N	S	2
A3	Plg	0,6x0,2	S	M	N	N	S	1
A4	Plg	0,4x0,2	E	B	PM	A1	P	0
A4	Plg	0,4x0,2	E	M	PM	A1 P1 CP2	S	1
A4	Plg	0,6x0,2	E	B	PM	CA1	P	3
A4	Olv	0,4x0,4	A	A	N	CA1 P2	N	1
A4	Plg	0,6x0,2	E	B	PM	CA1 CP1	S	3
A5	Plg	1x0,4	E	A	PM M	CA1	S	3
A5	Plg	0,8x0,2	S	M	PM	A1	N	1
A5	Plg	0,6x0,4	E	A	N	A2	N	0
A5	Plg	0,6x0,4	E	B	PM	N	S	3
A5	Plg	0,8x0,4	E	M	N	CA1	B	1
B1	Plg	1x0,5	E	B	N	CP2	S	2
B1	Plg	0,5x0,5	E	B	N	CP1	N	3
B1	Plg	0,5x0,2	E	B	N	CP3	S	0
B1	Plg	0,6x0,2	E	B	N	CP1	B	3
B1	Plg	0,8x0,2	E	B	PM	N	N	2
B2	Plg	1,1x0,5	E	M	N	N	S	2
B2	Plg	1x0,2	E	A	N	CP3	S	0
B2	Plg	0,8x0,4	S	A	PM	N	B	2
B2	Olv	0,6x0,5	A	A	N	N	N	1
B2	Plg	0,6x0,2	S	A	N	N	N	1
B3	Plg	1,5x0,6	S	A	N	N	S	3
B3	Plg	1,8x0,5	S	A	PM	N	N	2
B3	Plg	0,8x0,2	S	A	PM	N	S	3
B3	Plg	1,3x0,2	E	M	N	CP2	S	1
B3	Plg	0,5x0,4	E	M	PM	P2	N	3
B4	Plg	2,3X0,6	S	A	N	A2	S	0
B4	Plg	1,6x0,8	S	A	PM	A2	S	2
B4	Plg	1,3x1	S	A	N	A2	S	2
B4	Plg	3,2x1,1	S	A	N	N	P	2
B4	Plg	0,8x0,4	E	A	N	A1	P	2
B5	Olv	0,5x0,4	A	A	N	A2	N	0
B5	Plg	0,6x0,4	E	A	N	N	P	1
B5	Plg	0,6x0,2	E	B	N	N	B	3
B5	Plg	0,4x0,4	E	A	N	N	S	1
B5	Plg	0,5x0,2	E	M	PM	CP1	N	2
C1	Plg	1x0,2	E	A	N	N	N	4
C1	Plg	0,6x0,4	E	B	M	N	B	3
C1	Plg	0,6x0,4	S	A	N	P2	N	3
C1	Plg	1x0,4	S	B	N	N	N	2
C1	Plg	0,5x0,4	S	M	N	N	B	2
C2	Plg	0,6x0,5	E	A	N	A1 P1	S	2

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes. Vesícula: N° contactos vesícula – mineral.

C2	Plg	0,6x0,5	E	A	N	N	B	3
C2	Plg	0,4x0,2	S	A	N	N	N	2
C2	Plg	0,6x0,5	E	A	N	N	N	2
C2	Plg	0,4x0,2	S	A	N	N	N	3
C3	Plg	0,8x0,4	E	M	PM	N	B	4
C3	Cpx	0,8x0,6	A	A	PM M	N	N	4
C3	Plg	0,4x0,2	S	M	PM	N	S	3
C3	Plg	0,4x0,2	S	B	N	CP1	N	1
C3	Plg	0,5x0,2	S	M	N	N	S	0
C4	Olv	1x0,6	S	A	N	A1	N	3
C4	Plg	1x0,2	E	M	PM	CP1	P	3
C4	Plg	1x0,1	E	M	N	CP1	P	3
C4	Plg	0,4x0,2	S	A	N	N	S	4
C4	Plg	0,4x0,2	S	A	N	N	S	4
C5	Plg	1,1x0,2	E	M	N	P1	B	1
C5	Opx	0,4x0,4	E	M	M	N	N	1
C5	Plg	0,4x0,4	E	M	PM	N	P	2
C5	Plg	0,8x0,4	E	A	N	N	P	4
C5	Plg	0,5x0,4	E	A	N	N	N	2

Corte Zx Muestra B3 (Basalto Vesicular)

Zona	Mxl	Tamaño (mm)	Forma	Fracturas	Orientación	Interacción	Vidrio	Vesícula
A1	Plg	2X1,3	E	A	N	A1	S	2
A1	Plg	0,8X0,4	E	A	N	N	B	4
A1	Plg	0,6X0,4	S	A	PM	N	S	2
A1	Plg	0,6X0,3	E	A	N	N	N	3
A1	Plg	0,8x0,6	E	M	N	A1	P	1
A2	Plg	0,6x0,5	S	A	N	N	N	3
A2	Olv	0,5x0,4	A	A	N	A1	N	3
A2	Plg	0,5x0,4	S	A	N	CA1	N	3
A2	Olv	0,4x0,4	A	A	N	CA1	N	0
A2	Plg	0,5x0,4	E	A	N	N	N	1
A3	Plg	0,5x0,4	S	M	N	N	P	2
A3	Plg	0,6x0,2	E	A	N	N	S	3
A3	Plg	0,4x0,2	E	A	N	CA1	S	3
A3	Plg	0,4x0,2	E	M	N	N	P	4
A3	Plg	0,4x0,2	E	M	N	N	P	4
A4	Plg	1,6x0,4	E	M	N	A1	N	3
A4	Plg	0,8x0,4	E	M	N	N	N	4
A4	Plg	0,8x0,4	E	A	N	N	B	4
A4	Olv	0,5x0,4	E	B	N	P1	N	2
A4	Plg	0,6x0,4	E	A	N	N	S	2
A5	Plg	0,5x0,2	S	M	PM	N	B	2

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes. Vesícula: N° contactos vesícula – mineral.

A5	Plg	0,4x0,2	S	A	N	CP1	P	3
A5	Plg	0,4x0,2	S	A	N	CP1	P	3
A5	Cpx	0,4x0,4	S	A	M	A2	N	0
A5	Olv	0,2x0,2	A	A	N	N	N	0
B1	Plg	4x1,6	E	A	N	N	S	4
B1	Olv	1,5x1,3	A	A	N	N	N	2
B1	Plg	0,8x0,4	S	M	N	N	N	4
B1	Plg	0,8x0,4	E	A	N	A1	B	3
B1	Plg	0,8x0,4	E	A	N	A1	B	3
B2	Plg	1,3x0,4	E	A	N	N	N	4
B2	Plg	2,1x0,6	E	A	N	N	P	4
B2	Plg	1,1x0,6	E	M	N	N	S	2
B2	Plg	0,5x0,4	E	B	PM	A1	P	2
B2	Plg	0,4x0,2	S	B	N	N	S	2
B3	Plg	0,5x0,4	E	M	N	A2	S	2
B3	Olv	0,5x0,5	A	A	N	A1	N	2
B3	Plg	0,5x0,4	E	B	PM	N	S	3
B3	Plg	0,5x0,3	S	A	N	N	S	3
B3	Plg	0,4x0,3	E	B	N	N	N	1
B4	Plg	2,1x0,4	E	M	PM	N	B	4
B4	Olv	0,8x0,4	A	A	N	A2	N	0
B4	Olv	0,4x0,4	A	A	N	A4	N	0
B4	Plg	0,4x0,2	E	B	N	N	S	2
B4	Plg	0,3x0,3	S	A	N	N	P	3
B5	Opx	2,1x1,8	A	A	N	A2	N	2
B5	Plg	0,6x0,5	E	B	N	A2	N	0
B5	Plg	0,4x0,4	E	B	N	N	N	3
B5	Plg	2,1x0,5	E	A	N	N	N	4
B5	Plg	0,6x0,5	S	M	N	A1	N	0
C1	Plg	0,5x0,3	E	B	N	N	B	4
C1	Plg	0,4x0,2	E	M	N	N	N	3
C1	Plg	0,5x0,2	E	A	PM	N	P	2
C1	Olv	0,4x0,4	S	A	N	A1	N	3
C1	Plg	0,6x0,2	E	A	N	N	P	4
C2	Plg	3,4x1,1	S	A	PM M	N	B	4
C2	Olv	0,4x0,4	A	A	N	N	N	4
C2	Olv	0,5x0,4	A	A	N	N	N	4
C2	Olv	0,5x0,5	A	A	N	P1	N	0
C2	Plg	0,6x0,4	S	A	N	CP2	S	2
C3	Plg	0,6x0,2	S	A	N	N	B	4
C3	Plg	1,8x0,4	S	A	PM	A1	S	0
C3	Plg	1,5x0,5	S	A	PM	A2	S	2
C3	Plg	0,8x0,2	S	A	N	N	S	4
C3	Plg	0,8x0,2	S	A	N	N	S	4
C4	Plg	1,5x0,4	E	A	N	N	B	1
C4	Plg	1,5x0,5	E	A	N	CP2	P	2
C4	Plg	0,6x0,2	E	B	N	N	S	2
C4	Plg	0,6x0,2	E	M	N	CA1	P	1

Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes. Vesícula: N° contactos vesícula – mineral.

C4	Plg	0,4x0,2	E	B	N	N	P	2
C5	Plg	1x0,5	A	A	N	CA1	N	3
C5	Plg	0,5x0,2	E	A	N	N	P	3
C5	Olv	0,4x0,2	S	A	N	CA1	N	2
C5	Plg	0,6x0,2	S	A	N	N	N	2
C5	Plg	0,4x0,2	S	A	N	N	B	0



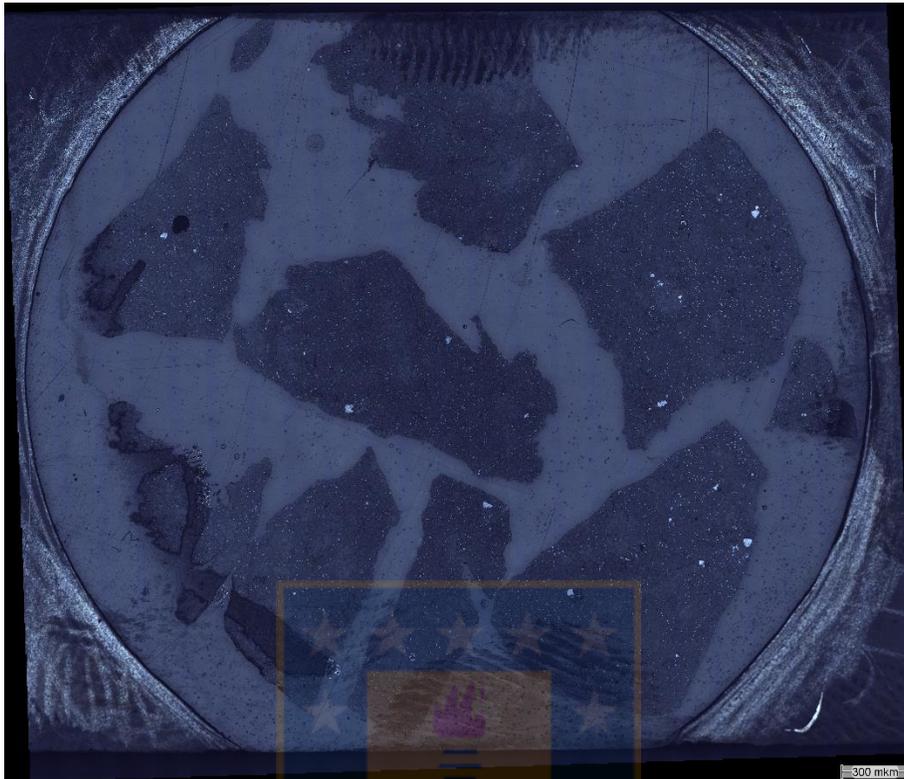
Forma: A-Anhedral, S-Subhedral, E-Euhedral. Fracturas: A-Alto, M-Medio, B-Bajo. Orientación: PM-Perpendicular Maclado, M-Paralelo Maclado, N-No tiene/No se distingue. Interacción: CA-Canal Arista, CP-Canal Punta, A-Arista, P-Punta, N-No tiene. Vidrio: S-Tiene, N-No tiene, P-Poco, B-Bordes. Vesícula: N° contactos vesícula – mineral.

ANEXO N° III

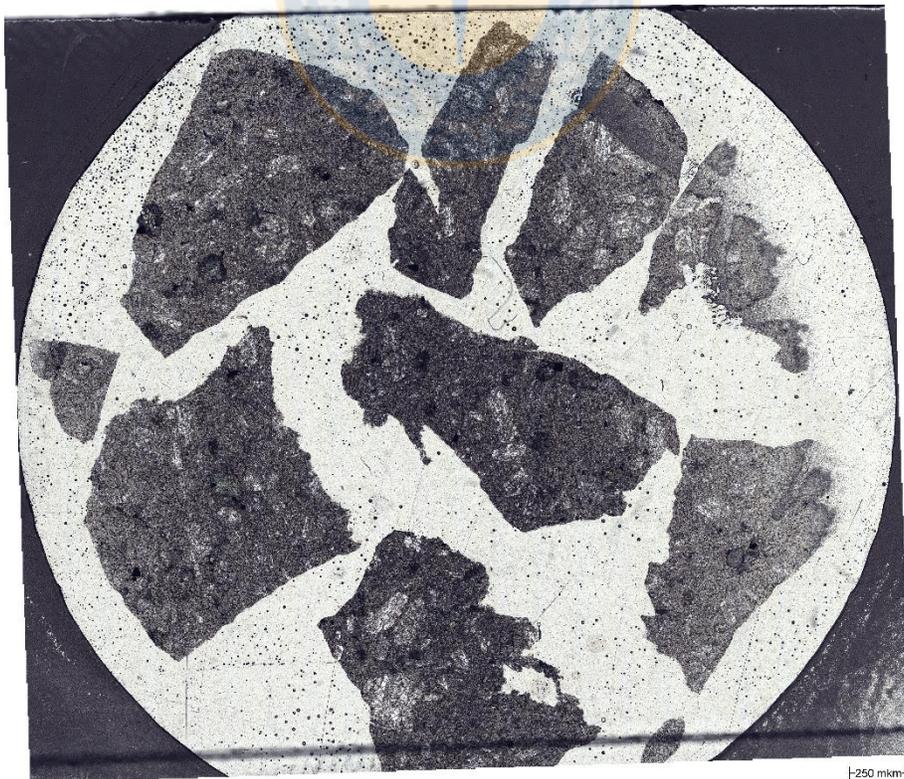
Escaneo Cortes Superficiales



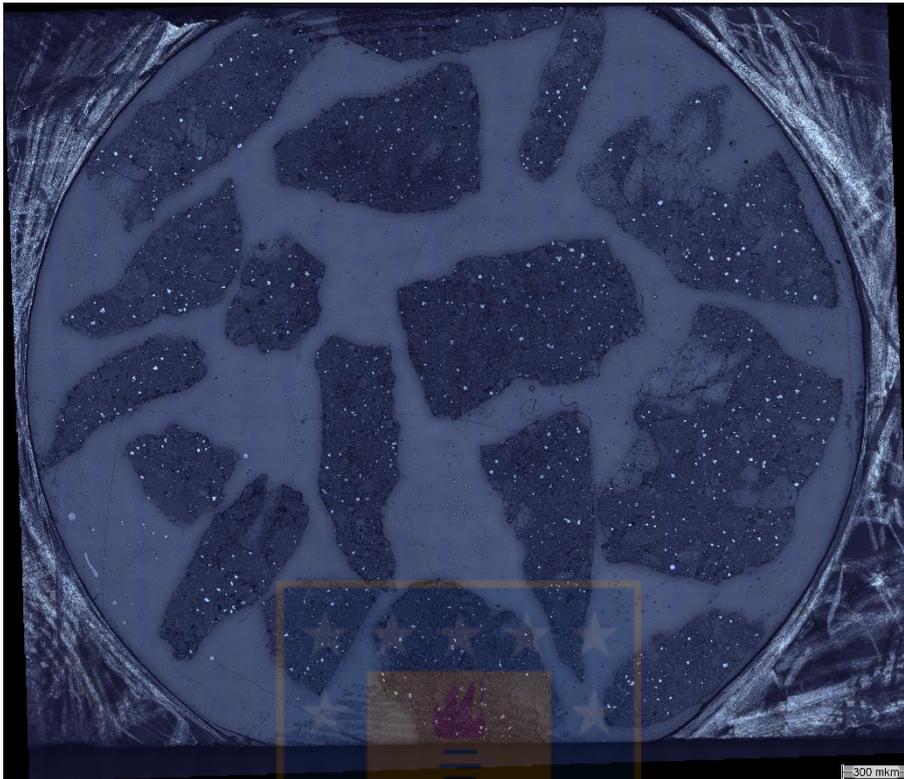
Escaneo Luz Reflejada Muestra A1 (Andesita)



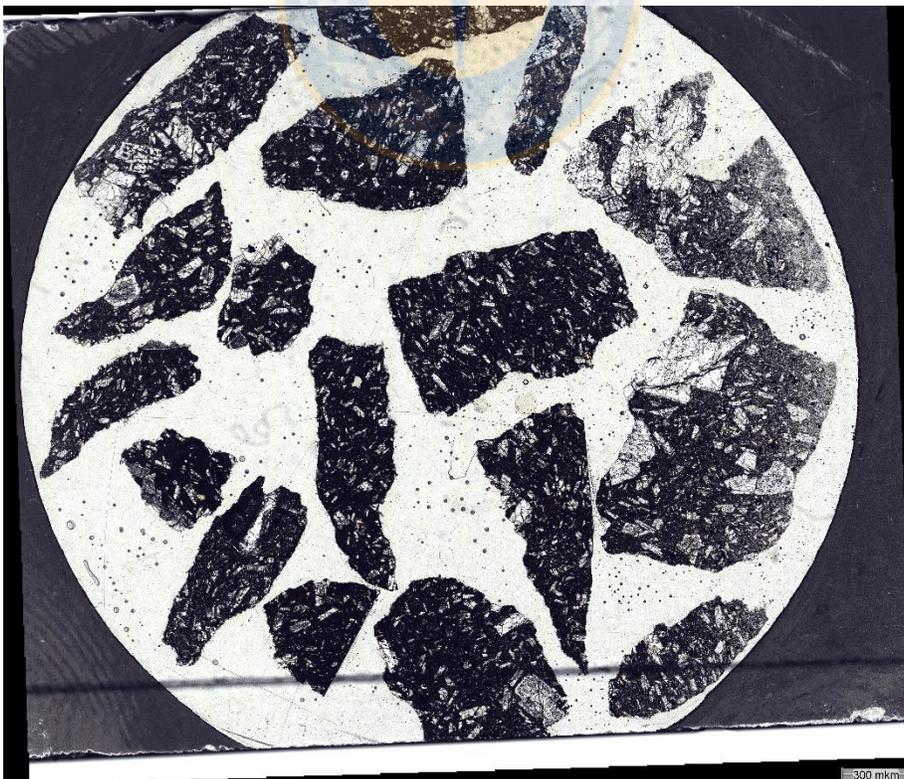
Escaneo Luz Transmitida Muestra A1 (Andesita)



Escaneo Luz Reflejada Muestra B2 (Basalto)



Escaneo Luz Transmitida Muestra B2 (Basalto)



Escaneo Luz Reflejada Muestra B3 (Basalto Vesicular)



Escaneo Luz Transmitida Muestra B3 (Basalto Vesicular)

